

**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE ȘI CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
DEPARTAMENTUL DE HIDRAULICĂ ȘI PROTECȚIA MEDIULUI**



**ANALIZA EXPERIMENTALĂ A PARAMETRILOR DE
FUNCȚIONARE AI TURBINELOR EOLIENE
CARCASATE DE PUTERE MICĂ ECHIPATE CU
DISPOZITIVE PASIVE DE CONTROL AL CURGERII**

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**Doctorand
Ing. Elena – Alexandra CHIULAN**

**Conducător de doctorat
Prof. univ. dr. ing. Anton ANTON**

**BUCUREȘTI
2019**

Cuvânt înainte

Prezenta teză de doctorat, intitulată ”Analiza experimentală a parametrilor de funcționare ai turbinelor eoliene carcasate de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii”, a fost elaborată în perioada octombrie 2016 – septembrie 2019 în cadrul Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului, al Facultății de Hidrotehnică, din Universitatea Tehnică de Construcții București.

Această lucrare de cercetare a fost parțial finanțată din: PN-III-P2-2.1-PED-2016-0631 - ”Turbină eoliană carcasată de putere mică echipată cu dispozitive pasive de control al curgerii”, Contract nr. 133/30.10.2018 – Institutul Național de Cercetare Aerospațială ”Elie Carafolie”, grantul intern ”GID 2018” – Școala Doctorală a Universității Tehnice de Construcții București

Cu această ocazie, aş vrea să îmi arăt sincera recunoștință conducătorului meu de doctorat, domnului prof. dr. ing. Anton Anton, pentru răbdarea, încurajările, sfaturile și suportul moral arătat de-a lungul activităților de cercetare desfășurate în cadrul tezei de doctorat, dar și pentru împărtășirea vastelor cunoștințe în domeniu, pe toată durata stagiului.

Mulțumiri speciale aş vrea să îi aduc domnului conf. dr. ing. Costin Ioan Coșoiu pentru sfaturile, susținerea morală și implicarea extrem de activă pe toată perioada elaborării tezei de doctorat, acesta comportând-se ca un al doilea conducător științific.

Aş vrea să le mulțumesc domnilor prof. dr. ing. Andrei-Mugur Georgescu, prof. dr. ing. Mircea Degeratu și prof. dr. ing. Liviu Valer Hașegan pentru recomandările și sugestiile formulate pe parcursul lucrării de cercetare.

Mulțumesc domnului Ovidiu Popescu, fără sprijinul și implicarea căruia, infrastructura de cercetare pe care au fost realizate testele experimentale din cadrul prezentei teze de doctorat, nu ar fi existat.

Doresc să mulțumesc, doamnei conf. dr. ing. Ilinca Năstase pentru sprijinul și sfaturile acordate pe perioada cercetărilor realizate în cadrul tezei de doctorat.

Cu această ocazie profit să mulțumesc tuturor colegilor din Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului, pentru atmosfera de colegialitate și prietenie creată, fără de care elaborarea tezei ar fi fost mai dificilă.

Nu în ultimul rând, aş dori să mulțumesc familiei și prietenilor mei, în special părinților, pentru sprijinul moral și încurajările permanente, de-a lungul anilor în care s-a desfășurat stagiul de doctorat.

București, Septembrie 2019

Elena – Alexandra CHIULAN

Cuprins teză de doctorat

Cuprins.....	1
Listă figuri	4
Listă tabele.....	16
Nomenclator	18
Listă abrevieri.....	18
Listă notații	18
Introducere	21
Generalități	21
Motivația cercetării	23
Obiectivele și conținutul tezei de doctorat.....	25
Bibliografie.....	26
1 Contextul general al cercetării	29
1.1 Introducere	31
1.2 Scurt istoric privind evoluția turbinele eoliene.....	31
1.3 Stadiul actual al producției de energie eoliană	36
1.4 Concepte constructive ale turbinelor eoliene	40
1.5 Performanțele turbinelor eoliene cu ax orizontal.....	45
1.6 Concluzii la capitolul 1.....	50
Bibliografie.....	51
2 Elemente de aerodinamica turbinelor eoliene cu ax orizontal	57
2.1 Introducere	59
2.2 Profile aerodinamice utilizate pentru elicele turbinelor eoliene.....	61
2.2.1 Definiție și caracteristici geometrice ale profilelor aerodinamice	61
2.2.2 Forțe și momente aerodinamice. Coeficienți aerodinamici	61
2.3 Principiul de funcționare al elementului de pală pentru elicea eoliană.....	66
2.4 Factorii care influențează eficiența turbinelor eoliene.....	70
2.5 Concluzii la capitolul 2.....	73
Bibliografie.....	74
3 Concepția și proiectarea demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii.....	75
3.1 Introducere	77
3.2 Manufacturarea demonstratorului experimental pentru turbine eoliene	78
3.2.1 Principalele componente ale demonstratorului experimental.....	78
3.2.2 Sistemul de achiziție, comandă și control al demonstratorului experimental	84
3.3 Echipamente de măsură pentru testele experimentale	91
3.3.1 Tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M.....	91
3.3.2 Balanța aerodinamică cu 6 componente BAR6C	94
3.3.3 Scannerul de presiune miniatural 300 traductori.....	97
3.4 Condiții de testare în vena experimentală a tunelului aerodinamic TASL1-M.....	101
3.5 Concluzii la capitolul 3.....	108
Bibliografie.....	108

4	Testări în regim static pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică în tunelul aerodinamic TASL1-M	111
4.1	Introducere	113
4.2	Planul de investigare experimentală pentru testările realizate în regim static	114
4.3	Prelucrarea datelor achiziționate din testările realizate în regim static	116
4.3.1	Determinarea coeficientului de putere (C_P) și moment (C_M)	116
4.3.2	Determinarea forței (T) și coeficientului (C_T) de rezistență la înaintare	129
4.3.3	Determinarea coeficienților de presiune ($c_{p,i}$) pe suprafața interioară a carcasei	134
4.4	Rezultate finale. Interpretarea rezultatelor	136
4.4.1	Evaluarea variației coeficientului de putere și moment în funcție de viteza specifică de rotație ($C_P(\lambda)$, $C_M(\lambda)$)	136
4.4.2	Evaluarea variației coeficientului de rezistență la înaintare în funcție de viteza specifică de rotație ($C_T(\lambda)$)	143
4.4.3	Evaluarea variației coeficienților de presiune ($c_{p,i}(x/L)$) pe suprafața interioară a carcasei	147
4.5	Concluzii la capitolul 4	151
	Bibliografie	152
5	Testări în regim dinamic pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică în tunelul aerodinamic TASL1-M	155
5.1	Introducere	157
5.2	Planul de investigare experimentală pentru testările realizate în regim dinamic	157
5.3	Prelucrarea datelor achiziționate din testările realizate în regim dinamic	159
5.3.1	Determinarea coeficientului de putere (C_P) și moment (C_M)	159
5.3.2	Re-eșantionarea variației coeficientului de putere și moment în funcție de viteza specifică de rotație ($C_P(\lambda)$, $C_M(\lambda)$)	171
5.4	Rezultate finale. Interpretarea rezultatelor	176
5.4.1	Evaluarea variației coeficientului de presiune și moment în funcție de viteza specifică de rotație ($C_P(\lambda)$, $C_M(\lambda)$)	176
5.5	Concluzii la capitolul 5	188
	Bibliografie	189
6	Concluzii finale	191
6.1	Introducere	193
6.2	Concluzii generale	193
6.3	Contribuții personale și originale ale autorului în domeniul de specialitate	202
6.4	Direcții viitoare de cercetare	203
	Bibliografie	204
	Anexa 1 – Planurile de investigare experimentală pentru testări realizate în regim static și dinamic	207
	Anexa 2 – Teste statice. Date experimentale brute și date filtrate	213
	Anexa 3 – Teste statice. Rezultate finale – curbe polinomiale de aproximare	215
	Anexa 4 – Teste experimentale. Rezultate finale – coeficienți de presiune	217
	Anexa 5 – Teste dinamice. Date experimentale brute și date filtrate	221
	Anexa 6 – Teste dinamice. Date filtrate – variația coeficientului de putere și moment în funcție de viteza specifică de rotație	235
	Anexa 7 – Teste dinamice. Rezultate finale – variația ($C_P(\lambda)$, $C_M(\lambda)$)	241
	Anexa 8 – Teste dinamice. Rezultate finale – curbe polinomiale de aproximare	245
	Anexa 9 – Teste statice și dinamice. Comparatii rezultate finale	247

Introducere

Generalități

Concentrarea societății asupra resurselor de energie regenerabilă a crescut, în mod semnificativ, începând cu cea de-a doua jumătate a secolului al XX-lea, ca urmare a creșterii poluării mediului (emisii de dioxid de carbon), a creșterii cererii de energie de energie „verde”, dar și a epuizării resurselor de combustibili fosili [1]. Conform [2÷3], crizele petrolului înregistrate în anii 1973, respectiv 1979, au reprezentat impulsul și motivația pentru realizarea cercetărilor la nivel mondial, în privința energiilor regenerabile. Unul dintre considerentele principale, ce a contribuit la dezvoltarea sistemelor alternative de energie, a fost reprezentat de capacitatea limitată a lumii de a face față poluării cauzate de arderea combustibililor fosili [1÷2].

Dintre sursele de energie regenerabilă, energia vântului este recunoscută ca fiind una dintre cele mai mature tehnologii de energie regenerabilă, cunoscând o dezvoltare accelerată în ultimul deceniu [2÷3]. La ora actuală, potențialul de energie eoliană ce poate fi utilizat pentru producerea de energie electrică este net superior comparativ cu alte surse de energie regenerabilă [1], iar în zonele în care există situri favorabile, puterea vântului a fost, deja, preferată față de combustibilii fosili convenționali pentru producerea de energie electrică [2].

Motivația cercetării

Marele avantaj al vântului constă în faptul că este o sursă de energie inepuizabilă, putând fi găsit în aproape toate zonele de pe planetă, nu implică niciun cost și poate fi transformat direct în electricitate, lucru care îl face o sursă de energie de calitate [1÷3]. Cu toate acestea, una dintre cele mai mari probleme ale energiei eoliene o reprezintă caracterul fluctuant al vântului, care este direct legat de condițiile meteorologice, și prin urmare, nu reprezintă o sursă de energie constantă [3÷4]. Mai mult decât atât, având în vedere că vântul reprezintă una dintre principalele surse de energie regenerabilă pentru producerea de energie, disponibilitatea de zone cu potențial eolian bun reprezintă un factor important pentru dezvoltarea tehnologiei de captare a energiei eoliene [1÷3].

În scopul exploatării energiei eoliene într-un mod cât mai economic și mai eficient posibil, în zonele cu potențial redus de energie, începând cu secolul al XX-lea au fost cercetate numeroase soluții inovatoare în vederea creșterii puterii furnizate de către agregat [2÷3]. Acestea au constatat în dezvoltarea unor turbine eoliene a căror comportament să fie caracterizat printr-o eficiență ridicată, fiabilitate și adaptabilitate la condițiile de implementare. Materializarea acestor cerințe s-a realizat prin carcasarea agregatelor eoliene, fapt ce a dus la creșterea vitezei vântului în secțiunea rotorului, cu efect de concentrare al energiei [3].

Obiectivele și conținutul tezei de doctorat

Obiectivul principal al lucrării de cercetare intitulată ”Analiza experimentală a parametrilor de funcționare ai turbinelor eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii” constă în investigarea experimentală a comportamentului unui nou concept de agregat eolian, în condiții controlate și reproductibile, simulate în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, din cadrul Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului ”Constantin Iamandi”, al Universității Tehnice de Construcții București.

Anterior, în cadrul Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului, au fost obținute atât rezultate teoretice, cât și numerice, privind curgerea în jurul turbinelor eoliene carcasate de

putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii [4÷5]. Nivelul de maturitate tehnologică, pentru această modalitate de producție a energiei, este echivalentul a TRL3, conform UEFISCDI. Scopul cercetării este acela de a atinge un nivel de maturitate tehnologică egal cu TRL4, pornind de la un nivel egal cu TRL3, pentru o nouă tehnologie de captare a energiei din vânt în situri unde potențialul eolian este slab sau în mediul construit, utilizând turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii.

Pentru îndeplinirea obiectivelor propuse, au fost urmate mai multe etape, astfel încât prin desfășurarea activităților de cercetare, să fie atins scopul propus. Conținutul tezei de doctorat este structurat în 6 capitole și 9 anexe ce vor fi detaliate în continuare.

În Capitolul 1, "Contextul general al cercetării", va fi prezentată o vastă documentare în domeniul de specialitate în care se vor evidenția progresul tehnologic al turbinelor eoliene în decursul timpului, tipurile de agregate eoliene, stadiul actual al producției de energie eoliană la nivel global, european și la nivelul României, dar și cuantificarea performanțelor agregatelor eoliene cu ax orizontal.

Capitolul 2, "Elemente de aerodinamica turbinelor eoliene", va detalia aspecte legate de aerodinamica palelor turbinelor eoliene, unde vor fi prezentate tipurile de profile aerodinamice utilizate pentru proiectarea palelor agregatelor eoliene, principiul de funcționare al elementului de pală al elicei eoliene, dar și factorii intrinseci ce pot influența eficiența agregatelor.

În Capitolul 3, "Concepția și proiectarea demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii", vor fi descrise procesul de manufacturare și principalele componente ale demonstratorului, sistemul de achiziție, comandă și control ale acestuia, echipamentele de măsură împreună cu aplicațiile corespunzătoare utilizate pentru realizarea testelor experimentale, dar și condițiile de testare ce au trebuit respectate pentru efectuarea măsurătorilor în tunelul aerodinamic TASL1-M.

Capitolul 4, "Testări în regim static pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică în tunelul aerodinamic TASL1-M", va prezenta metodologia de realizare a măsurătorilor realizate în regim static ce au presupus achiziția, în paralel, pe modelul demonstratorului cu rotor liber, respectiv carcasat a parametrilor mecanici (n , M), încărcărilor statice din vânt (F_x , M_y) și a distribuțiilor locale de presiune (p_i) pe suprafața interioară a carcasei. Vor fi prezentate etapele urmărite în procesul de prelucrare a datelor experimentale, dar și interpretate rezultatele obținute pentru aceste tipuri de testări.

Capitolul 5, "Testări în regim dinamic pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică în tunelul aerodinamic TASL1-M", este dedicat testărilor realizate în regim dinamic pe demonstratorul experimental și va detalia metodologia de realizare a măsurătorilor în tunelul aerodinamic TASL1-M, prelucrarea parametrilor mecanici (n , M) achiziționați din determinări experimentale, dar și reprezentarea, respectiv interpretarea rezultatelor obținute pentru aceste măsurători.

Capitolul 6, "Concluzii finale", va prezenta rezultatele finale obținute pentru toate tipurile de teste experimentale efectuate în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M și va evalua performanțele înregistrate pe modelul demonstratorului cu rotor liber și carcasat. De asemenea, vor fi evidențiate contribuțiile personale și originale ale autorului, rezultate din activitate de cercetare desfășurată pentru realizarea lucrării, dar și posibilele, direcțiile viitoare de cercetare.

În Anexa 1 ÷ Anexa 9 vor fi detaliate atât planul de investigare experimentală pentru realizarea testelor în regim static și dinamic, cât și datele prelucrate pentru diferite cicluri de testare măsurate pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică. Anexele sunt prezentate detaliat în varianta extinsă a tezei de doctorat.

1 Contextul general al cercetării

Cu toate că energia vântului a fost utilizată încă din antichitate, dezvoltarea tehnologică a energiei eoliene este atribuită după cea de-a doua jumătate a secolului al XX-lea [1÷2].

Istoria utilizării și valorificării, de către omenire, a vântului ca sursă de energie, a început încă din antichitate. Cu peste 5000 de ani în urmă, vechii egipteni au folosit vântul pentru propulsarea navelor pe râul Nil. Apariția primelor mori de vânt este atestată documentar în Persia, Iranul de astăzi, în perioada 500 ÷ 900 î.Hr. [1].



Figura 1.1 – Ambarcațiune cu vele utilizată de egipteni în antichitate (stânga) [2] moară de vânt persană din anii 500 ÷ 900 î.Hr. (mijloc) [1] și prima moară de vânt pentru producția electricității, James Blyth, 1887 (dreapta) [2]

Una dintre cele mai importante etape în evoluția istoriei energiei eoliene a coincis cu creșterea drastică a prețului petrolului în anii 1970 [1÷2], când interesul umanității a fost îndreptat către sectorul producției de energie cu ajutorul resurselor regenerabile [2]. La ora actuală [1÷2], industria eoliană este, în continuare, în plină expansiune datorită creșterii costurilor energiei electrice și ca urmare a îmbunătățirii tehnologiei de captare a vântului [1÷2].

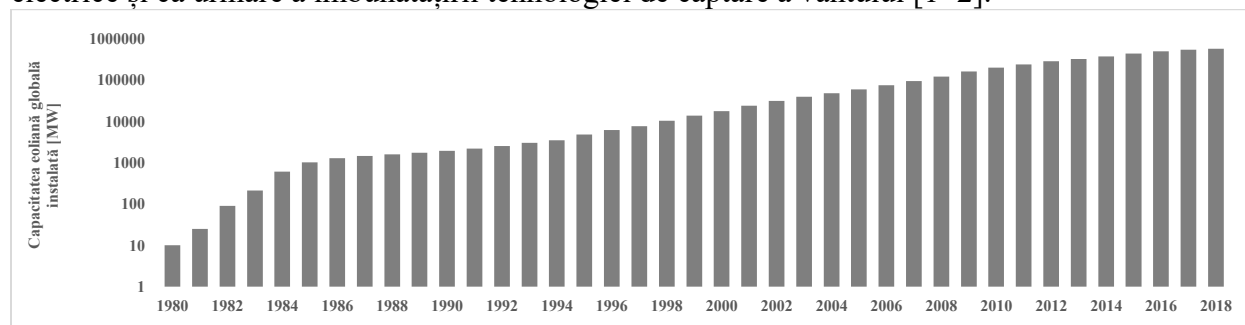


Figura 1.2 – Evoluția capacității eoliene instalate la nivel mondial în perioada 1980 ÷ 2018 [6÷7]

La nivel mondial, atât tehnologia, cât și modalitatea de exploatare a energiei eoliene cu ajutorul agregatelor eoliene este una avansată [1÷2]. Din analiza graficului din Figura 1.2, se poate observa faptul că, dacă în anul 1980, capacitatea globală instalată avea o valoare de 10 MW [6], aceasta a crescut până la 7.60 GW [7] în anul 1997, ajungând ca la sfârșitul anului 2018 valoarea totală a puterii mondiale instalate în agregate eoliene să fie aproximativ 568 GW [7].

Cu toate că, din Figura 1.2 se poate constata faptul că în ultimele două decenii tehnologia de producție și punerea în aplicare a soluțiilor eoliene a cunoscut o dezvoltare ascendentă, totuși aceasta este departe de a-și atinge limitele [10]. În domeniul producției de energie eoliană au apărut unele probleme. Probleme din domeniul producției de energie eoliană s-au datorat dinamicii accelerate a primelor două decenii ale secolului XXI și pot fi rezumate după cum urmează:

1. Disponibilitatea de situri cu potențial eolian bun. În mod normal, turbinele eoliene moderne produc energie în mod eficient începând de la viteze medii ale vântului de 7 m/s [8]. În zonele

unde vântul bate frecvent la viteze mai mici, energia din vânt nu poate fi colectată folosind mijloace clasice.

2. Caracterul aleatoriu al sursei de energie exploatare și factorul redus de utilizare a turbinelor eoliene actuale.

3. Noile cereri din partea societății și dezvoltarea de noi tehnologii care implică apariția unei noi piețe orientate către consumatorii casnici, micile comunități din regiunile în curs de dezvoltare, cu acces redus sau fără acces la rețeaua electrică existentă.

O soluție posibilă pentru a putea utiliza turbine eoliene, în locuri unde viteza vântului este scăzută este aceea de a crește local viteza vântului în zona rotorului [3]. Acest lucru se poate realiza prin creșterea debitului de aer folosind o carcasă cu efect de concentrare al vântului în secțiunea rotorului turbinei [3].

Ideea de carcasare a rotoarelor agregatelor eoliene nu reprezintă un concept nou. Aceste dispozitive au fost introduse pe piață în anul 1979, unde le-a fost recunoscută eficiența comparativ cu sistemele eoliene convenționale [9]. Studiile de referință efectuate în domeniu, pe diferite forme de carcase utilizate pentru creșterea performanțelor agregatelor eoliene cu ax orizontal, pot fi considerate cele realizate [10÷14].

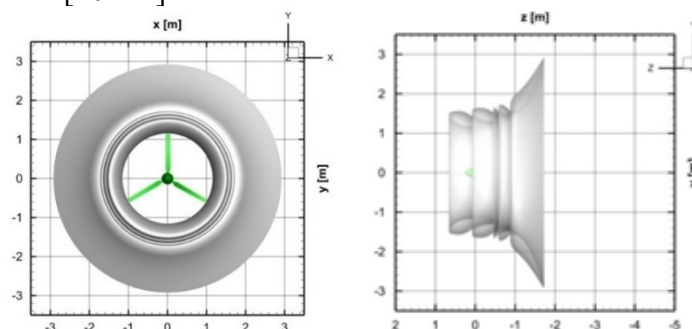


Figura 1.3 - Model turbină eoliană carcasată testată în cadrul Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului al Universității Tehnice de Construcții București [4÷5] vedere față (stânga) și vedere laterală (dreapta) carcasă v_{11}

În cadrul Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului al Universității Tehnice de Construcții București, este dezvoltată o nouă tehnologie de producție a energiei din vânt, acest lucru realizându-se cu ajutorul turbinelor eoliene carcasate de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii. În trecut, a fost testată o carcasă și au fost obținute rezultate promițătoare în ceea ce privesc performanțele sale [4÷5]. Carcasa, denumită v_{11} , testată anterior este prezentată în Figura 1.7. Performanța carcaserii se bazează pe patru efecte aerodinamice, rezultate din patru concepte diferite [4÷5], ce au fost studiate anterior de alți cercetători, în vederea îmbunătățirii performanțelor turbinelor eoliene, fiind combinate într-o abordare integrală pentru o eficiență sporită [4÷5].

Concluzii la capitolul 1

De-a lungul timpului, dezvoltarea tehnologică a industriei turbinelor eoliene a cunoscut o creștere accelerată, ce este capabilă, la ora actuală, prin aplicațiile sale, să asigure cerințele pieței.

Dintre soluțiile constructive, cele mai des utilizate, pentru proiectarea agregatelor eoliene, s-au remarcat două tipuri de turbine, și anume, cu ax vertical și cu ax orizontal. Deși, în ultimele două decenii tehnologia de producție și punere în aplicare a soluțiilor constructive de turbine eoliene a devenit una matură, totuși, aceasta este departe de a-și atinge limitele. Astfel, au fost cercetate și dezvoltate diverse concepte de agregate eoliene care să fie capabile să depășească limita impusă de Albert Betz, în anul 1926 ($C_{P,max} \cong 59.30\%$).

2 Elemente de aerodinamica turbinelor eoliene cu ax orizontal

Optimizarea performanței aerodinamice este unul dintre factorii fundamentali pentru dezvoltarea și evoluția industriei turbinelor eoliene [15], atât în ceea ce privește tehnologia de construcție a agregatelor eoliene, cât și procesul de producție de energie cu ajutorul turbinelor eoliene. În decursul timpului, au fost realizate studii și cercetări ce au condus la creșterea dimensiunii, a eficienței și a fiabilității agregatelor eoliene [16], prin reducerea costurilor, a complexității și a riscurilor implicate [16]. Cu toate acestea, una dintre principalele probleme ale industriei, ce are un impact semnificativ asupra cantității maxime de energie cinetică ce poate fi extrasă din vânt, o reprezintă aerodinamica palelor turbinelor eoliene [15].

În mod uzual, palele rotoarelor turbinelor eoliene cu ax orizontal, de tip elice, sunt proiectate având la bază un anumit profil aerodinamic [15÷16]. Astfel, pentru proiectarea unor pale optime din punct de vedere aerodinamic, geometria acestora trebuie să aibă o formă optimă, ce este capabilă să asigure o producție maximă de energie [16]. Forma optimă a palelor elicelor eoliene este funcție de anumiți parametri optimi ce definesc geometria palei, cum ar fi distribuția corzii pe lungimea palei, grosimea corzii și distribuția torsiunii în lungul palei [15÷16].

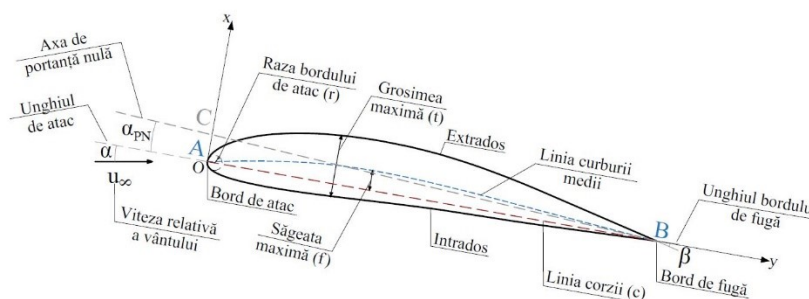


Figura 2.1 - Reprezentare caracteristici geometrice corespunzătoare unui profil aerodinamic [15]

În proiectarea curentă a palelor turbinelor eoliene cu ax orizontal cele mai des utilizate profile aerodinamice sunt cele dezvoltate de National Renewable Energy Laboratory [17]. Familii de profile aerodinamice NREL (S801÷S823) au corespuns cel mai bine criteriilor optime de performanță necesare pentru proiectarea elicelor eoliene (coeficient de portanță (C_L) mare și valoarea raportului ce definește finețea profilului aerodinamic ($\gamma = C_L/C_D$) mare) [15].

O metodă de evaluare a comportamentului, în mișcare, a palelor turbinelor eoliene dispuse în curentul de aer [18÷19] o reprezintă teoria elementului de pală. În Figura 2.2 este reprezentată schema principiului de funcționare a elementului de pală al elicei eoliene, împreună cu diagramele de viteză asociate [18÷19]. Notățiile utilizate în Figura 2.2 au următoarea semnificație: $u_\infty(1 - a)$ este viteza curentului de aer, u_{rel} este viteza relativă la profil, $-u = \Omega(1 + a')$ este viteza mișcării de translație, Ω este viteza de rotație a palei, α este unghiul de incidență sau unghiul de atac, θ este unghiul dintre viteza relativă la profil (u_{rel}) și planul de rotație, $\phi = \theta - \alpha$ este unghiul de așezare.

Din analiza schemei corespunzătoare elementului de pală, din Figura 2.2, pentru principiul de funcționare al elicei eoliene se poate spune că aceasta imprimă o mișcare de uniformă cu viteză unghiulară Ω , dar și una de translație ce este dirijată după axul elicei cu viteza u_∞ [19÷20]. De asemenea, este evidențiat faptul că, sub acțiunea vitezei vântului asupra palei va acționa o forță aerodinamică (F_a) [18÷19]. Se poate constata că viteza u_∞ , este constantă în lungul palei, dar viteza u variază în lungul palei cu r [19].

Pentru principiul de funcționare al elicei eoliene, se poate concluziona faptul că, la un moment dat, în timpul mișcării de rotație a palei, deoarece viteza u variază în lungul palei cu r ,

viteza compusă u_{rel} să își modifice unghiul față de planul de rotație (θ) astfel încât unghiul de incidență geometrică (α) să aibă valoarea optimă pentru care raportul dintre portanță și rezistența la înaintare (γ) să aibă valoare maximă (finețe maximă) [18÷19].

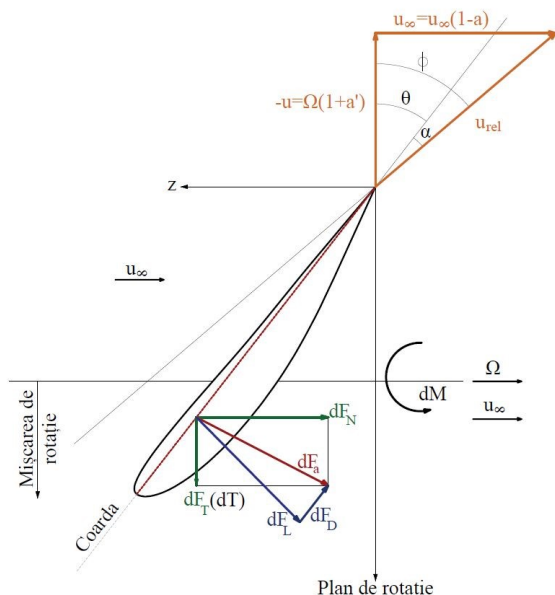


Figura 2.2 – Schema principiului de funcționare al elementului de pală al elicei eoliene [18÷19]

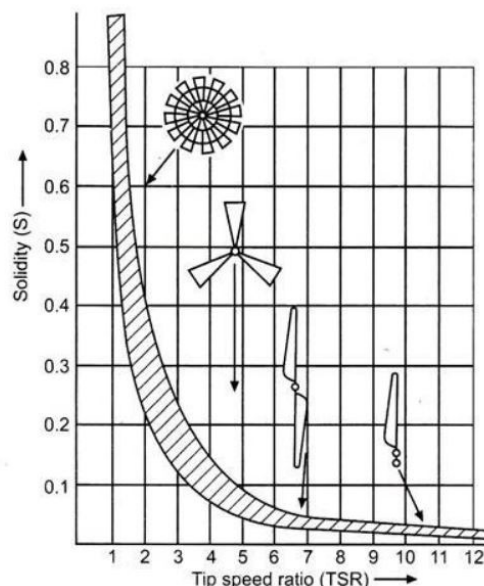


Figura 2.3 – Variația factorului de soliditate (σ_c) în funcție de viteza specifică de rotație (λ) [18÷19]

Eficiența sau performanța unei turbine eoliene se referă la cantitatea de energie extrasă din energia totală a curentului de aer care traversează rotorul agregatului [9÷10]. Dintre parametrii intrinseci care influențează eficiența turbinelor eoliene se enumeră următorii doi parametri: viteza specifică de rotație (λ) și factorul de soliditate (σ_c) [18÷19].

Din informațiile furnizate de literatura de specialitate [18÷19], se poate spune că atât viteza specifică de rotație (λ), cât și parametrul de soliditate (σ_c) depind de numărul de pale ale turbinei. Între cei doi parametri existând o relație de legătură. În Figura 2.3 este evidențiată variația factorului de soliditate (σ_c) în funcție de viteza specifică de rotație (λ). Din Figura 2.3 se poate concluziona faptul că, dintre categoriile de agregate eoliene prezentate, pentru turbina eoliană cu ax orizontal cu trei pale este obținut cel mai bun raport dintre factorul de soliditate (σ_c) și viteza specifică de rotație (λ) la vârful palei. De asemenea, această soluție constructivă este preponderent utilizată în practica curentă de proiectare și producție a industriei eoliană [18÷19].

Concluzii la capitolul 2

În decursul timpului, au fost cercetate și special dezvoltate numeroase familii de profile aerodinamice pentru realizarea palelor agregatelor eoliene cu ax orizontal. Performanța aerodinamică, corespunzătoare acestor profile, a condus la optimizarea și îmbunătățirea eficienței generale a turbinelor eoliene. De asemenea, forțele ce acționează asupra palelor au un rol important în buna funcționare, în exploatare, a turbinelor eoliene. Metodele avansate de calcul, au permis evaluarea corectă a mărimii acestor forțe, fapt ce a condus la obținerea unor agregate eficiente și fiabile.

Testarea și studierea, încă din procesul de proiectare, a factorilor intrinseci (λ , σ_c) a permis conceperea, dar și utilizarea, la ora actuală, a unor soluții constructive optime capabile să asigure cererea de energie din partea consumatorilor.

3 Concepția și proiectarea demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii

3.1 Introducere

În cadrul Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului "Constantin Iamandi", din Universitatea Tehnică de Construcții București, a fost proiectat și dezvoltat un stand experimental pentru investigarea parametrilor de funcționare ai turbinelor eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii [20]. Principalul obiectiv, ce a stat la baza manufacturării demonstratorului experimental, prezentat în Figura 3.1, a constat în introducerea unui nou concept de agregat eolian, dar și în testarea și studierea acestuia în condiții controlate și reproductibile, simulate în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M.

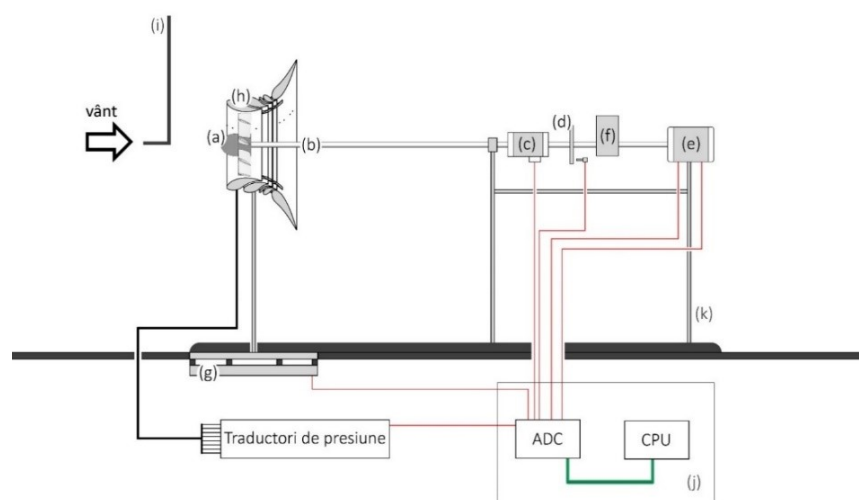


Figura 3.1 – Schema principială de funcționare a standului experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii [20]

În primă fază, modelul unei turbine eoliene clasice, cu rotor standard a fost testat pentru a evalua, în mediu controlat, performanțele sale. De asemenea, pe modelul agregatului cu rotor liber a fost stabilită referința la scară de laborator pentru măsurătorile efectuate pe demonstratorul experimental. Ulterior, același rotor al turbinei, care a fost utilizat pentru primul tip de experiment, a fost folosit cu o carcasă echipată cu dispozitive pasive de control al curgerii. Performanțele înregistrate pe agregatul eolian cu rotor carcasat au fost comparate, coerent, cu referința stabilită în cadrul primului experiment. Parametrii de funcționare ai modelului turbinei cu rotor liber și carcasat au fost investigați pentru aceleași condiții de testare. Testele experimentale efectuate în regim static și dinamic, pe demonstratorul de laborator, au demonstrat conceptul și au cuantificat performanțele sale în raport cu nivelul de dezvoltare al tehnologiei actuale.

Schema principială de funcționare a standului experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii este reprezentată în Figura 3.1. Notațiile utilizate în Figura 3.1, au următoarea semnificație: (a) rotorul turbinei eoliene, (b) axul turbinei eoliene, (c) traductor de cuplu, (d) traductor de turație, (e) motor pas cu pas, (f) cutie de viteze, (g) balanta aerodinamică cu 6 componente BAR6C, (h) carcasă echipată cu dispozitive pasive de control al curgerii și instrumentată cu prize de presiune, (i) tub Pitôt-Prandl, (j) sistem de achiziție, comandă și control, (k) suportul demonstratorului experimental.

3.2 Manufacturarea demonstratorului experimental pentru turbine eoliene

3.2.1 Principalele componente ale demonstratorului experimental

Pentru cuantificarea performanțelor obținute pe agregatul eolian carcasat, unul dintre principalele componente ale demonstratorului experimental a fost reprezentat de carcasa folosită pentru măsurătorile experimentale. Ținând cont de performanțele anterior dovedite prin studii numerice, dar și experimentale ale carcasei echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii, denumită v_{11} , dezvoltată în cadrul Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului "Constantin Iamandi", s-a optat pentru utilizarea acesteia în timpul testelor experimentale efectuate pe demonstratorul experimental [4÷5].

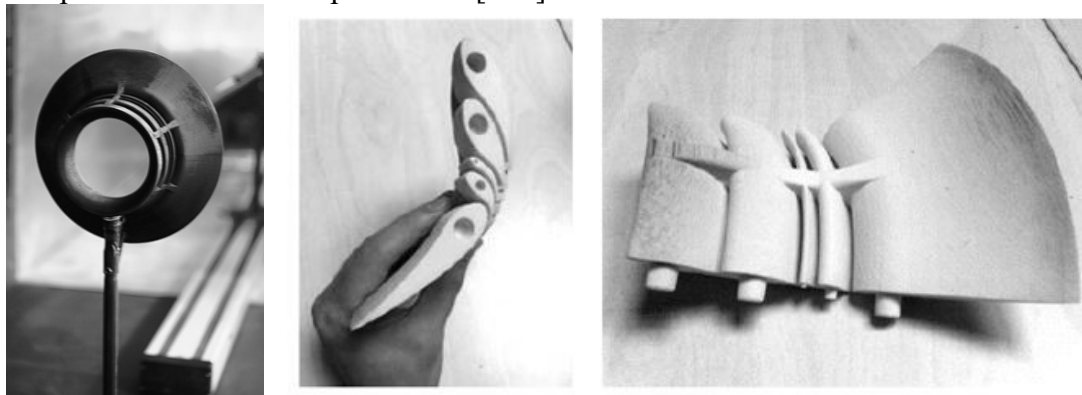


Figura 3.2 – Carcasa echipată cu dispozitive pasive de control al curgerii v_{11} (stânga) și detalii din timpul procesului de manufacturare a acesteia (dreapta) [4÷5]

Soluția constructivă folosită pentru manufacturarea rotorului a fost cea de rotor cu 3 pale. Alegerea a fost bazată pe faptul că, din studiile de specialitate realizate în decursul timpului, s-a constatat faptul că cea mai mare valoare a factorului de eficiență (C_p) pentru turbinele eoliene cu ax orizontal este obținută pentru rotoarele cu 3 pale [10÷14], [18÷19]. Pentru palele rotorului V_2 a fost folosit profilul aerodinamic NREL s809 [17], ce este utilizat în mod curent pentru realizarea palelor rotoarelor de turbină eoliană.

Modelul rotorului turbinei eoliene a fost manufacturat pe imprimanta 3D, ce există în cadrul Departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului. Materialul utilizat a fost plastic PLA. Datorită nivelului ridicat de detaliu necesar, rotorul a fost printat din mai multe bucăți, ce au fost asamblate ulterior. Figura 3.3 prezintă aspecte din timpul manufacturării și asamblării rotorului V_2 .

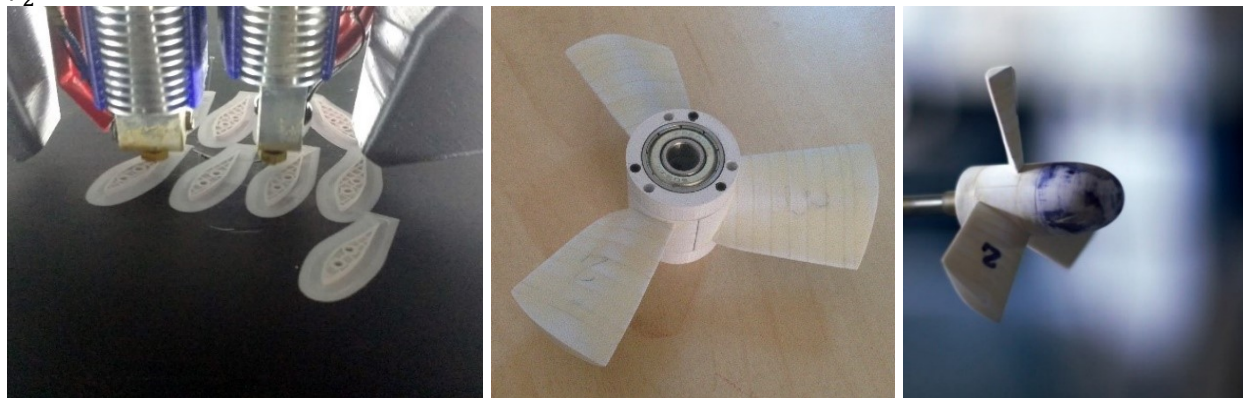


Figura 3.3 – Etape din timpul procesului de printare 3D a elementelor componente corespunzătoare palelor butucul rotorul V_2

Demonstratorul experimental a fost realizat astfel încât să respecte conceptul descris în paragraful 3.1 și să poată integra carcasa v_{11} (Figura 3.2), respectiv rotorul V_2 (Figura 3.3). Detaliile demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii sunt prezentate în Figura 3.4.

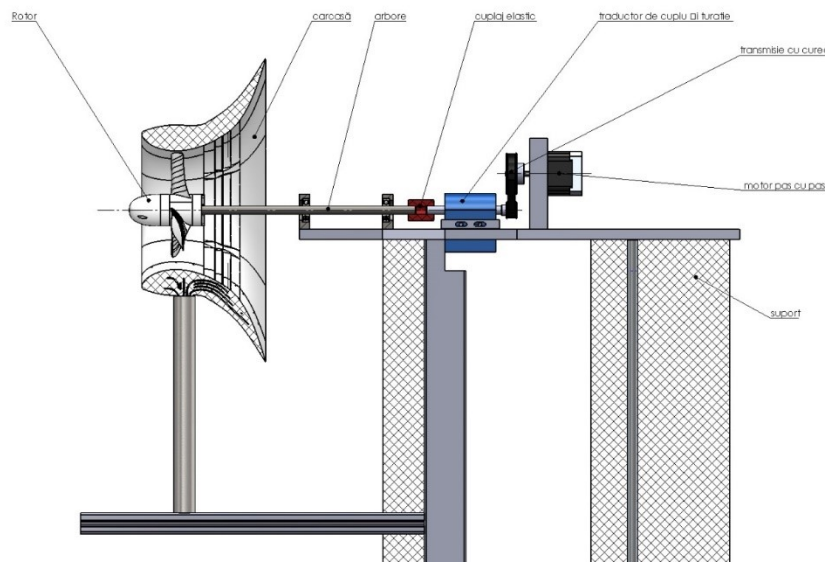


Figura 3.4 – Principalele componente ale modelului experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii: vedere longitudinală

3.2.2 Sistemul de achiziție, comandă și control al demonstratorului experimental

Sistemul de achiziție, comandă și control a fost proiectat și conceput cu scopul de a prelua datele experimentale de la traductori, rezultate din măsurătorile efectuate în regim static și dinamic pe demonstratorul experimental cu rotor liber, dar și cu rotor carcasat, în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M. Din Figura 3.1 se constată faptul că cele două componente principale, ce formează sistemului complex de achiziție, comandă și control, sunt reprezentate de sistemul utilizat pentru conversia unui semnal analogic în semnal digital (ADC = Analog to Digital Converter) și unitatea centrală de procesare a datelor experimentale (CPU = Central Processing Unit).

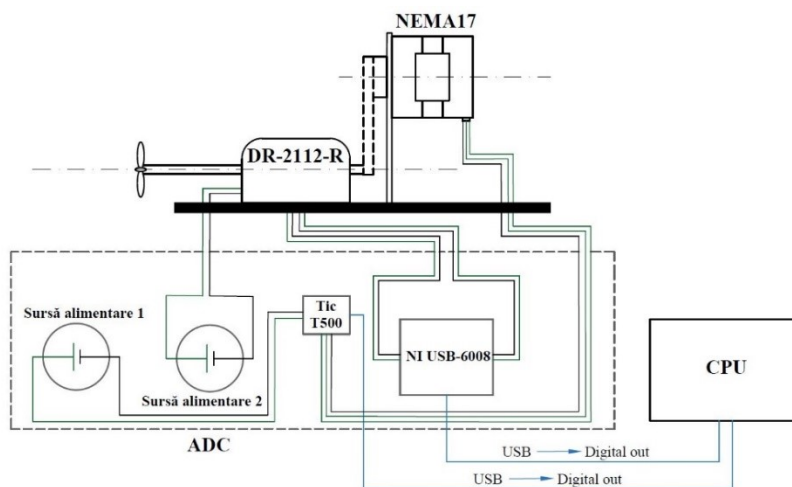


Figura 3.5 - Schema principiului de conversie a semnalelor analogice în semnale digitale (ADC), în raport cu demonstratorul experimental și cu unitatea centrală de procesare a datelor experimentale (CPU)

În Figura 3.5 este prezentat schematic procesul ce stă la baza funcționării sistemului (*ADC*), prin intermediul căruia un semnal analogic este convertit în semnal digital, în raport cu demonstratorul experimental pentru turbine eoliene de putere mică, respectiv cu unitatea centrală de procesare a datelor experimentale (*CPU*). Din analiza schemei principiului de conversie a semnalelor analogice în semnale digitale (*ADC*), din Figura 3.5, se poate spune că întreg procesul poate fi descris astfel:

1. Sursa de alimentare 1 alimentează drive-ul de motor, Tic T500, al sistemului *ADC*. Acesta este conectat la un computer, prin intermediul unui cablu USB micro-B, unde este instalată aplicația ce permite monitorizarea drive-ului de motor. Din aplicația Pololu Tic Control Center este comandat motorul pas cu pas, model NEMA17, al demonstratorului de laborator ce are o revoluție de 200 pași/ciclu.
2. Sursa de alimentare 2 alimentează traductorul de cuplu și turație, model DR-2112-R, al standului experimental. Semnalul traductorului de cuplu este conectat la o intrare analogică a plăcii de achiziție NI USB-6008, iar cel de turație la una din cele două intrări digitale ale aceleiași plăci.

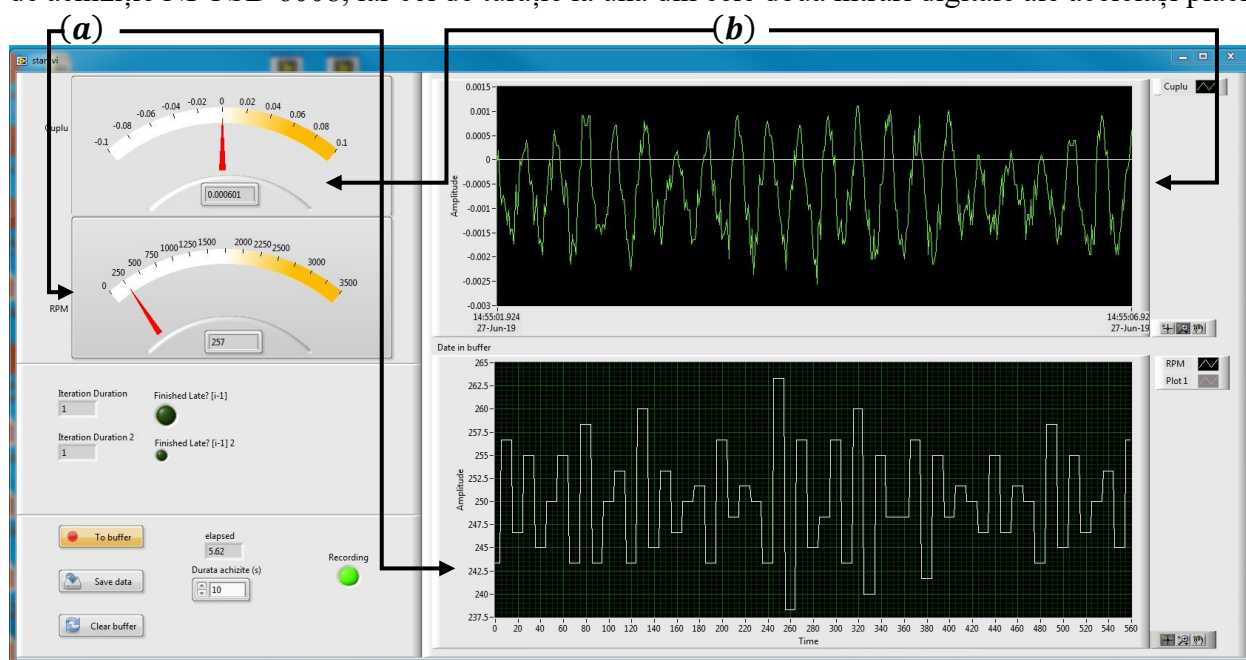


Figura 3.6 – Interfața aplicației sistemului de achiziție, comandă și control a demonstratorului experimental: monitorizare parametrii mecanici (n, M) pentru puncte de funcționare ale turbinei eoliene măsurate în regim static

Sistemul de achiziție, comandă și control (*ADC* și *CPU*), al demonstratorului experimental a fost comandat, în mod automat, prin intermediul unei aplicații dezvoltate în programul LabView, instalată pe un computer conectat, la acesta, prin intermediul unui cablu de tip USB.

În Figura 3.6 este prezentată o captură de ecran unde se poate vedea interfața aplicației de comandă și achiziție de date a demonstratorului experimental. Semnificațiile notațiilor utilizate pentru parametrii mășurați și monitorizați cu ajutorul aplicației demonstratorului experimental, sunt următoarele: (a) turația (n) măsurată la arborele turbinei în regim static, (b) cuplul (M) măsurat la arborele turbinei în regim static.

Aplicația de comandă a permis monitorizarea grafică, în timp real (buffer), a parametrilor achiziționați (turația (n) și cuplul (M)). Durata achiziției de date a fost setată din aplicație. De asemenea, aplicația a permis salvarea și exportarea datelor achiziționate în fișiere de tip .xls.

3.3 Echipamente de măsură pentru testele experimentale

Echipamentele de măsură utilizate pentru realizarea testelor experimentale pe modelul turbinei eoliene de putere mică, pe lângă sistemul de achiziție, comandă și control special conceput pentru demonstratorul experimental, au constat în: tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, balanța aerodinamică cu 6 componente BAR6C, scannerul de presiune miniatural 300 de traductori.

3.3.1 Tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M

Toate determinările experimentale efectuate pe modelul experimental s-au desfășurat în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M aflat în dotarea Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului "Constantin Iamandi", din Universitatea Tehnică de Construcții București.

Tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, prezentat în Figura 3.7, este un tunel aerodinamic cu circuit deschis și cu venă experimentală ghidată lungă. Din punct de vedere al caracteristicilor geometrice, tunelul aerodinamic TASL1-M are o lungime totală de 25000 mm și o venă experimentală cu secțiunea interioară de 1750 mm x 1750 mm. Lungimea zonei de lucru, alcătuită din zona în care se dezvoltă stratul limită, zona experimentală propriu-zisă și zona de vizitare, este de 20850 mm [9÷10].

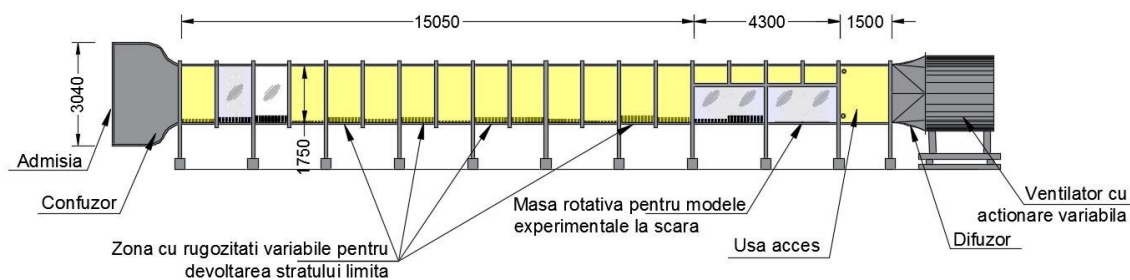


Figura 3.7 – Tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, aflat în dotarea Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului "Constantin Iamandi", din Universitatea Tehnică de Construcții București: vedere în plan [9÷10]

Stratul limită atmosferic poate fi simulat în tunelul aerodinamic TASL1-M atât ca profil de viteză medie, cât și ca structură turbulentă. În Figura 3.10 se poate observa că principalele părți componente sunt următoarele [21÷22]: admisia, confuzorul profilat, 7 tronsoane curente echipate cu sistem de rugozitate variabilă, 2 tronsoane pentru amplasarea modelelor experimentale, tronson de vizitare, ventilator axial.

3.3.2 Balanța aerodinamică cu 6 componente BAR6C

Balanța aerodinamică cu 6 componente BAR6C se află în dotarea Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului "Constantin Iamandi", din Universitatea Tehnică de Construcții București. Testele experimentale realizate cu ajutorul balanței aerodinamice BAR6C au constat în măsurarea sarcinilor statice ce acționează, sub influența vântului (u_∞), pe modelul turbinei eoliene cu rotor liber și carcasat, amplasat în vena experimentală a tunelului aerodinamic cu strat limită TASL1-M.

Din analiza schemei principiului de funcționare al balanței aerodinamice BAR6C, prezentat în Figura 3.8, se poate observa faptul că forțele, respectiv momentele pe modelul demonstratorului, au fost determinate pe cele trei direcții de măsură, în sistemul de coordonate $xOyz$ atașat balanței în raport tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M (direcție x - rezistența la înaintare (F_x , M_x), direcție y - portanța (F_y , M_y) și direcție z - tangaj (F_z , M_z)).

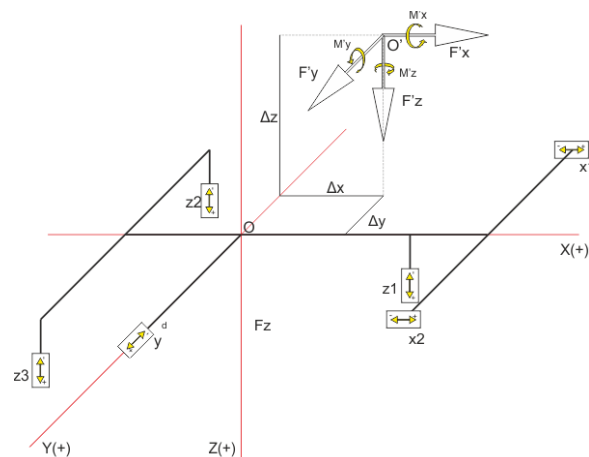


Figura 3.8 – Schema principiului de funcționare a balanței aerodinamice cu 6 componente BAR6C aflată în dotarea Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului ”Constantin Iamandi”

3.3.3 Scannerul de presiune miniatural 300 traductori

Măsurătorile experimentale, realizate pentru determinarea distribuției simultane de presiuni diferențiale locale pe modelul turbinei eoliene cu rotor carcasat, instalat în tunelul aerodinamic TASL1-M, au fost efectuate cu scannerul de presiune miniatural 300 de traductori. Acesta este prezentat în Figura 3.9 și se află în dotarea Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului ”Constantin Iamandi”, din Universitatea Tehnică de Construcții București.

Carcasa echipată cu dispozitive pasive de control al curgerii, v_{11} , este instrumentată cu 8 prize de presiune, ce au fost legate la traductorii scannerului de presiune miniatural 300 de traductori. Figura 3.10 prezintă poziția prizele de presiune amplasate pe suprafața interioară a carcasei echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii.



Figura 3.9 – Scannerul de presiune miniatural 300 de traductori, aflat în dotarea Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului ”Constantin Iamandi”

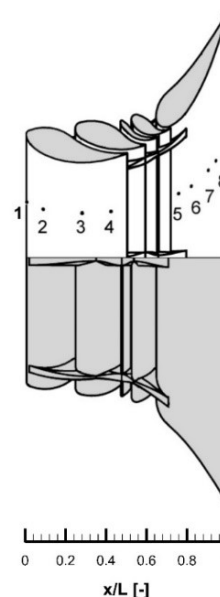


Figura 3.10 – Schemă prize de presiune amplasate pe suprafața interioară a carcasei echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii, v_{11}

3.4 Condiții de testare în vena experimentală a tunelului aerodinamic TASL1-M

Efectuarea investigațiilor experimentale, a presupus, în primul rând, instalarea modelului demonstratorului experimental în vena experimentală a tunelului aerodinamic TASL1-M. Înainte de a începe campaniile de măsurători experimentale, a fost necesară determinarea cu o precizie cât mai bună a vitezei vântului (u_∞) în vena experimentală a tunelului aerodinamic TASL1-M, considerată în planul de investigare experimentală.

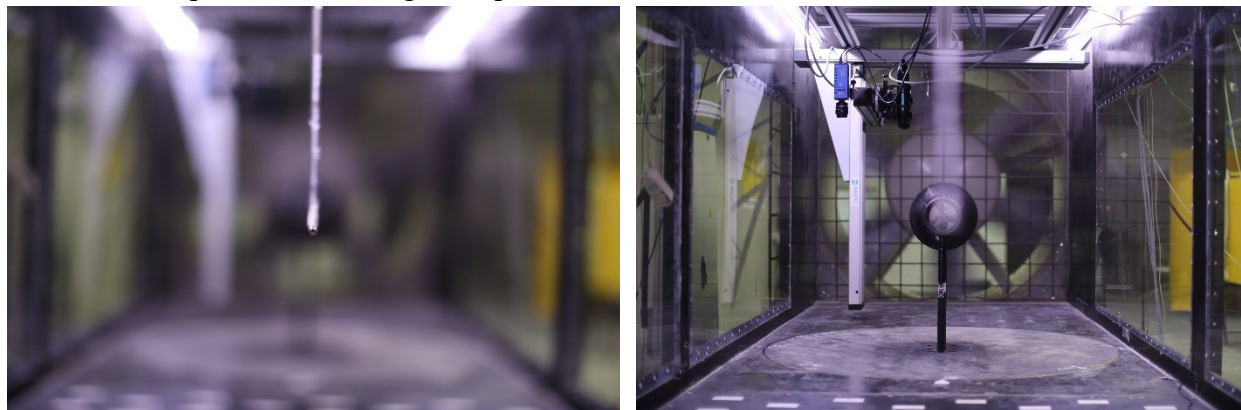


Figura 3.11 – Tubul Pitôt-Prandl amplasat în secțiunea de testare a tunelului aerodinamic cu strat limită TASL1-M (stânga) și aspecte privind condițiile de testare în vena experimentală a tunelului aerodinamic TASL1-M (dreapta)

Relația prin care a fost determinată valoarea vitezei vântului incident (u_∞) în secțiunea de testare a tunelului aerodinamic cu strat limită TASL1-M este următoarea [23]:

$$u_\infty = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho_{aer}}} \quad (3.1)$$

unde: u_∞ este viteza vântului incident în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, p_d este presiunea dinamică, ρ_{aer} este densitatea aerului.

Testele experimentale pe modelul demonstratorului experimental au fost realizate în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, considerând o înălțime a sistemului de rugozitate variabilă egală cu 0 mm.

În desfășurarea campaniei de investigare experimentală, primul set de teste experimentale a fost cel realizat pe modelul cu pe rotor carcasat. Apoi, a fost demontată carcasa, v_{11} , de pe modelul demonstratorului, pentru efectuarea celui de-al doilea set de măsurători experimentale, și anume, teste experimentale pe modelul cu rotor liber.

Concluzii la capitolul 3

Demonstratorul experimental, proiectat și manufacturat pentru fundamentarea unei noi tehnologii, a îndeplinit toate cerințele necesare pentru testarea și analiza parametrilor de funcționare în regim static și dinamic ai modelului turbinei eoliene cu rotor liber și carcasat.

Elementele componente ale demonstratorului experimental, au fost alese, astfel încât, să fie posibilă studierea comportamentului agregatului pe toată plaja de valori posibile, corespunzătoare diferitelor viteze specifice de rotație (λ) la arborele turbinei. Configurația standului de laborator a permis realizarea și altor tipuri de investigații experimentale, aplicabile agregatelor eoliene, și anume, încărcările statice din vânt pe modelul turbinei eoliene, respectiv distribuțiile de presiune locală pe suprafața interioară a carcasei v_{11} .

4 Testări în regim static pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică în tunelul aerodinamic TASL1-M

4.1 Introducere

Pentru validarea noului concept de agregat eolian, în mediu de laborator, au fost efectuate, în primul rând, măsurători experimentale în regim static, pe demonstratorul experimental.

Pentru testele efectuate în regim static, au fost măsurate caracteristicile mecanice ale rotorului, turația (n) și cuplul (M), cu ajutorul sistemului de achiziție, comandă și control al demonstratorului experimental. De asemenea, în același timp, au fost măsurate și sarcinile statice (F_x , M_y) ce acționează pe modelul experimental cu rotor liber și carcasat, cu ajutorul balanței aerodinamice cu 6 componente BAR6C. Pentru a avea o perspectivă mai profundă asupra mecanismului de control al curgerii utilizat de carcasa v_{11} , în cadrul testelor efectuate pe modelul cu rotor carcasat, în paralel cu parametrii detaliați anterior, au fost măsurate și distribuțiile de presiune locală (p_i), cu scannerul de presiune miniatural 300 de traductori.

4.2 Planul de investigare experimentală pentru testările realizate în regim static

Planul de investigare experimentală a fost elaborat pentru a putea surprinde comportamentul rotorului pe toată plaja de valori posibile, pentru diferite viteze specifice de rotație (λ), pe modelul demonstratorului. Aceste măsurători au presupus un regim de funcționare cu turație și viteză a vântului constante. Pentru ciclurile realizate în regim static au fost măsurate turația (n) și cuplul (M) la arborele turbinei. Vitezele vântului (u_∞), considerate în tunelul aerodinamic TASL1-M, au fost de 5.00 m/s, 5.50 m/s, 6.00 m/s și 6.50 m/s.

Din aplicația sistemului de achiziție, comandă și control a fost prestabilită și menținută constantă valoarea turației (n_{impus}) la arborele turbinei. Pentru măsurătorile efectuate în regim static, considerând diferite valori ale vitezei specifice de rotație (λ_{propus}) ale rotorului, a fost determinată turația pentru un anumit punct de funcționare din planul de investigare experimentală.

Valoarea turației la arborele turbinei (n_{impus}), pentru o anumită viteză specifică de rotație a rotorului (λ_{propus}), a fost calculată cu următoarea relație de calcul [24]:

$$n_{impus} = \frac{\lambda_{propus} \cdot u_\infty \cdot t}{2\pi \cdot R} \quad (4.1)$$

unde: λ_{propus} viteza specifică de rotație, u_∞ viteza vântului în TASL1-M, t timpul, R raza rotor.

Considerând cele patru viteze distincte ale vântului în tunelul aerodinamic TASL1-M, specificate anterior, au fost măsurati parametrii mecanici (n , M) pentru 87 cicluri în regim static pe modelul cu rotorul liber, respectiv 71 cicluri pe modelul cu rotorul carcasat.

Pe modelul demonstratorului, evaluarea sarcinilor statice din vânt, respectiv a distribuțiilor de presiune locală pe suprafața interioară a carcasei au fost efectuate pentru aceleași valori ale turației prestabilite (n_{impus}), respectiv aceleași viteze specifice de rotație (λ_{propus}) ale rotorului.

4.3 Prelucrarea datelor achiziționate din testările realizate în regim static

Pentru o analiză corectă a rezultatelor, fiecare campanie de măsurători a presupus achiziția a 1000 de eșantioane pe un interval de timp de 10 secunde pentru testele experimentale realizate

pentru măsurarea parametrilor mecanici, respectiv a 100 de eşantioane pe o durată de timp egal cu 10 secunde pentru determinarea sarcinilor statice, dar și a distribuțiilor de presiune locală. Procesul de prelucrare a datelor achiziționate a fost același pentru cele două campanii de teste experimentale, realizate pe demonstratorul experimental pentru turbine eoliene.

4.3.1 Determinarea coeficientului de putere (C_P)

Varianta aleasă pentru prelucrarea celor doi parametrii mecanici a fost de a se calcula valorile mediate ($\tilde{n}$, $\tilde{M}$) utilizând o fereastră alunecătoare centrată, medierea făcându-se pe 10 valori (0.10 secunde). În Figura 4.1 ÷ Figura 4.2 sunt prezentate date cuplul măsurat (M), pentru modelul cu rotor liber și carcasat. Testele măsurate în regim static, alese pentru exemplificare sunt corespunzătoare unei viteze specifice de rotație (λ) egală cu $\lambda=1.00$ ($n_{impus}=1041.74$ rpm), iar viteza vântului (u_∞), în tunelul aerodinamic TASL1-M, egală cu aproximativ 6.00 m/s.

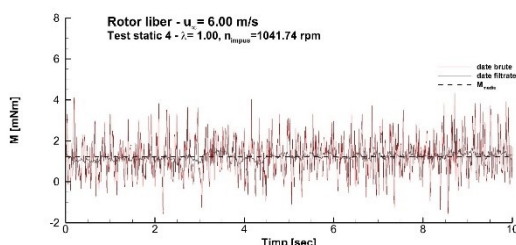


Figura 4.1 – Rotor liber. Cuplu (M). Date brute și date filtrate ($\lambda=1.00$, $n_{impus}=1041.74$ rpm, $u_\infty=6.00$ m/s)

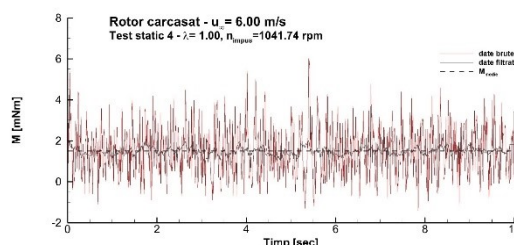


Figura 4.2 – Rotor carcasat. Cuplu (M). Date brute și date filtrate ($\lambda=1.00$, $n_{impus}=1041.74$ rpm, $u_\infty=6.00$ m/s)

Cu datele astfel obținute, au fost calculate viteza de rotație (ω), puterea extrasă de turbină din vântul în tunelul aerodinamic TASL1-M (P) și puterea teoretică (P_t) a turbinei. Pe baza caracteristicilor detaliate anterior, au fost determinate valorile vitezei specifice de rotație (λ) și coeficientului de putere (C_P), dar și abaterea medie standard pentru coeficientul de putere ($\sigma(C_P)$) pentru fiecare ciclu măsurat în regim static [24÷25]. Din rezultatele obținute pentru viteza specifică de rotație (λ) și coeficientul de putere (C_P), au fost calculate valorile medii ale acestora ($\bar{\lambda}$, $\bar{C}_P$), corespunzătoare fiecărui ciclu măsurat pentru modelul cu rotor liber, respectiv cu rotor carcasat.

4.3.2 Determinarea forței (T) și coeficientului (C_T) de rezistență la înaintare

Prelucrarea datelor experimentale, rezultate din măsurarea sarcinilor statice pe modelul demonstratorului, a constat în determinarea forței de rezistență la înaintare (T) ce acționează pe axul modelului turbinei eoliene sub influența vântului (u_∞) din tunelul aerodinamic TASL1-M. De asemenea, a fost obținut și coeficientului de tracțiune (C_T), ce evaluează rezistența totală la înaintare pentru agregatul eolian cu rotor liber și carcasat. Pentru calculul forței de tracțiune (T), dintre datele obținute din măsurătorile experimentale, au fost necesare cele achiziționate pentru forța măsurată pe direcția x (F_x), respectiv momentul măsurat pe direcția y (M_y).

În Figura 4.3 ÷ Figura 4.4 sunt reprezentate datele pentru forța măsurată pe direcția x (F_x), respectiv pentru momentul măsurat pe direcția y (M_y) pentru modelul cu rotor liber și carcasat, pentru diferite cicluri tipice de testare. Testele alese pentru exemplificarea datelor achiziționate, corespund unei viteze specifice de rotație $\lambda=1.00$ ($n_{impus}=1041.74$ rpm), iar viteza vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic TASL1-M a fost de aproximativ 6.00 m/s.

Prelucrarea seriilor de date corespunzătoare sarcinilor statice achiziționate (F_x , M_y) a constat în determinarea coeficientului de tracțiune (C_T), dar și a abaterii medii standard

corespunzătoare coeficientului de tracțiune ($\sigma(C_T)$) [24]. Forța de tracțiune (T) a fost calculată considerând o distanță $d = 0.58$ m măsurată de la axul rotorului turbinei eoliene până la punctul de calibrare a balanței aerodinamice. Din rezultatele obținute pentru coeficientul de rezistență la înaintare (C_T), au fost determinate valorile medii ale acestuia ($\overline{C_T}$) pentru fiecare test experimental.

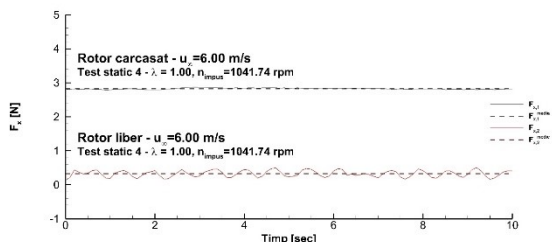


Figura 4.3 – Rotor liber și rotor carcasat (F_x). Date brute și medii ($\lambda = 1.00$, $n_{impus} = 1041.74$ rpm, $u_{\infty} = 6.00$ m/s)

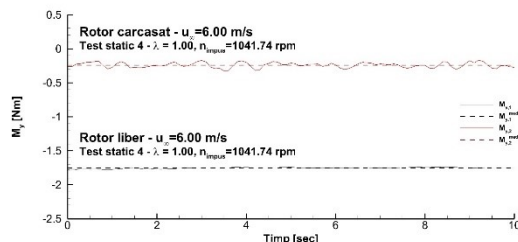


Figura 4.4 – Rotor liber și rotor carcasat (M_y). Date brute și medii ($\lambda = 1.00$, $n_{impus} = 1041.74$ rpm, $u_{\infty} = 6.00$ m/s)

4.3.3 Determinarea coeficienților de presiune ($c_{p,i}$) pe suprafața interioară a carcsei

Teste experimentale au constatat în achiziția presiunilor (p_i) prin intermediul celor 8 traductori de presiune ce sunt legați la suprafața interioară a carcsei v_{11} .

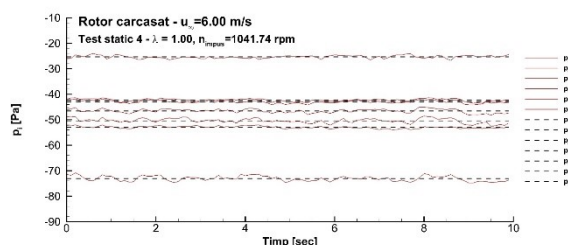


Figura 4.5 – Rotor carcasat. Cuplu (M). Date brute și date filtrate ($\lambda = 1.00$, $n_{impus} = 1041.74$ rpm, $u_{\infty} = 6.00$ m/s)

Prelucrarea seriilor de date experimentale achiziționate (p_i) a constatat în determinarea valorilor corespunzătoare coeficienților de presiune ($c_{p,i}$), dar și a abaterii medii standard corespunzătoare coeficienților de presiune ($\sigma(C_T)$) [24÷25]. Din rezultatele obținute pentru coeficientului de presiune ($c_{p,i}$), au fost determinate valorile medii ale acestuia ($\overline{c_{p,i}}$) pentru fiecare măsurătoare realizată pe modelul de turbină eoliană cu rotor carcasat.

4.4 Rezultate finale. Interpretarea rezultatelor

Rezultatele finale obținute din prelucrarea datelor achiziționate din testele realizate în regim static pe demonstratorul experimental cu rotor liber și carcasat au fost reprezentate de variația coeficientului de putere ($C_P(\lambda)$) și rezistență la înaintare ($C_T(\lambda)$) în funcție de viteza specifică de rotație, dar și de variația coeficientului de presiune pe suprafața interioară a carcsei ($c_{p,i}(x/L)$). De asemenea, pentru fiecare ciclu măsurat, este reprezentată și valoarea calculată pentru abaterea medie standard ($\sigma(C_P)$, $\sigma(C_T)$, $\sigma(c_{p,i})$).

4.4.1 Evaluarea variației coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_P(\lambda)$)

În Figura 4.6, valorile coeficientului de putere (C_P) determinate pentru modelul experimental cu rotorul liber sunt prezentate cu simboluri de culoare roșie, respectiv cele obținute pentru modelul cu rotor carcasat sunt reprezentate cu simboluri de culoare neagră. Valoarea calculată pentru abaterea medie standard caracteristică fiecărui test experimental, ($\sigma(C_P)$), este

reprezentată cu linie continuă gri. Reprezentările grafice pentru variația coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație sunt corespunzătoare vitezelor vântului (u_∞) aproximativ egale cu 6.00 m/s. Rezultatele obținute pentru celelalte viteze considerate în planul de investigare experimentală, sunt detaliate în varianta extinsă a tezei.

Din analiza rezultatelor obținute pentru coeficientului de putere (C_p), din Figura 4.6, s-a observat faptul că valorile obținute pentru modelul cu rotor carcasat sunt mai mari comparativ cu cele obținute pentru modelul cu rotor liber. Aceste valori mai mari sunt normale, deoarece rolul principal al carcasei este de a crește performanțele agregatului eolian. De asemenea, s-a constatat că valorile coeficientului de putere (C_p) cresc pe măsură ce crește viteza vântului în tunelul TASL1-M. Această creștere a fost evidențiată pentru modelul cu rotorul liber și carcasat.

Din rezultatele prezentate în Figura 4.6, se poate constata faptul că valorile coeficientului de putere (C_p), obținute pe modelul cu rotor liber din testele măsurate în regim static nu depășesc limita Betz ($C_p^{Betz} = 0.593$). De asemenea, analizând rezultatele obținute pentru modelul cu rotor carcasat, se poate observa faptul că valorile coeficientului de putere (C_p) obținute din ciclurile măsurate în regim static, depășesc limita Betz ($C_p^{Betz} = 0.593$).

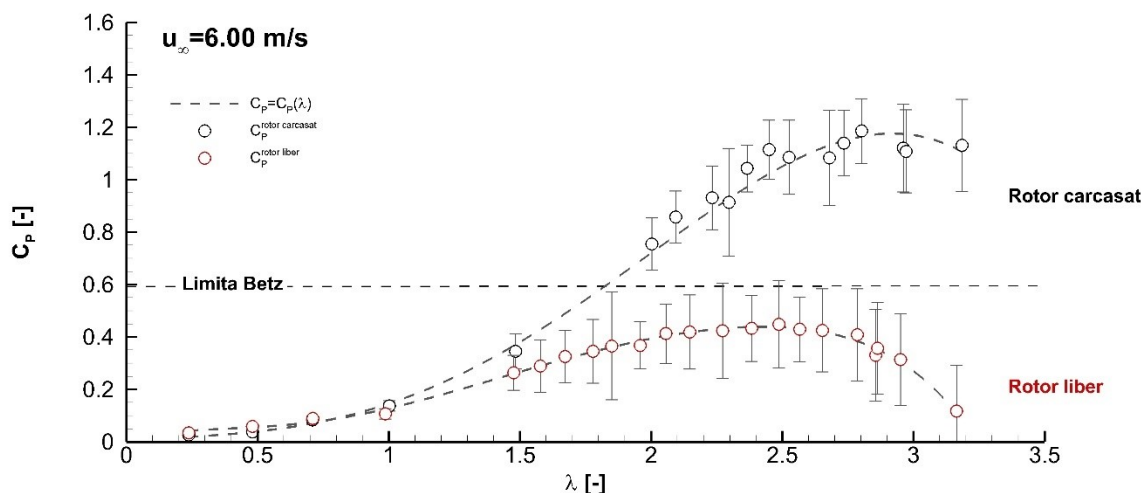


Figura 4.6 – Teste statice. Variație coeficient de putere (C_p) în funcție de viteza specifică de rotație (λ) ($u_\infty = 6.00$ m/s)

Pentru abaterea medie standard a coeficientului de putere ($\sigma(C_p)$), s-a constatat faptul că domeniile de variație ale mărimilor determinate se înscriu în limitele $\pm 3.00\% \div \pm 9.50\%$, pentru majoritatea testelor măsurate în regim static pe modelul cu rotor liber și carcasat.

Din analiza rezultatelor obținute, atât pentru modelul turbinei eoliene cu rotorul liber și carcasat, s-a observat faptul că pot fi trasate curbe polinomiale de aproximare a variației coeficientului de putere (C_p) în funcție de viteza specifică de rotație (λ). Pe reprezentările grafice din Figura 4.6, curbele polinomiale de aproximare a variației coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_p(\lambda)$) sunt simbolizate cu linie discontinuă gri.

4.4.2 Evaluarea variației coeficientului de rezistență la înaintare în funcție de viteza specifică de rotație ($C_T(\lambda)$)

În Figura 4.7, valorile coeficientului de tracțiune (C_T) determinate din testele experimentale realizate pe modelul cu rotor liber sunt reprezentate cu simboluri de culoare roșie, respectiv cu simboluri de culoare neagră cele determinate pe modelul cu rotor carcasat. Cu linie continuă gri este reprezentată valoarea calculată pentru abaterea medie standard ($\sigma(C_T)$). Pentru exemplificarea au fost alese rezultatele corespunzătoare unei viteze a vântului în tunelul aerodinamic TASL1-M

de aproximativ 6.00 m/s. Pentru celelalte viteze ale vântului considerate în planul de măsurători, rezultatele au fost detaliate în varianta extinsă a tezei de doctorat.

Prin compararea rezultatelor obținute pentru coeficientul de tracțiune (C_T), reprezentate în Figura 4.7, s-a constatat faptul că valorile determinate pe modelul cu rotor carcassat sunt de aproximativ 6 ori mai mari decât cele pentru modelul cu rotor liber.

De asemenea, din Figura 4.7, s-a observat faptul că viteza specifică de rotație (λ) nu influențează în mod semnificativ valoarea coeficientului de tracțiune (C_T), aceasta fiind aproximativ constantă. Un ușor aport adus, în creșterea valorii coeficientului de rezistență la înaintare (C_T), l-a avut viteza vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic TASL1-M.

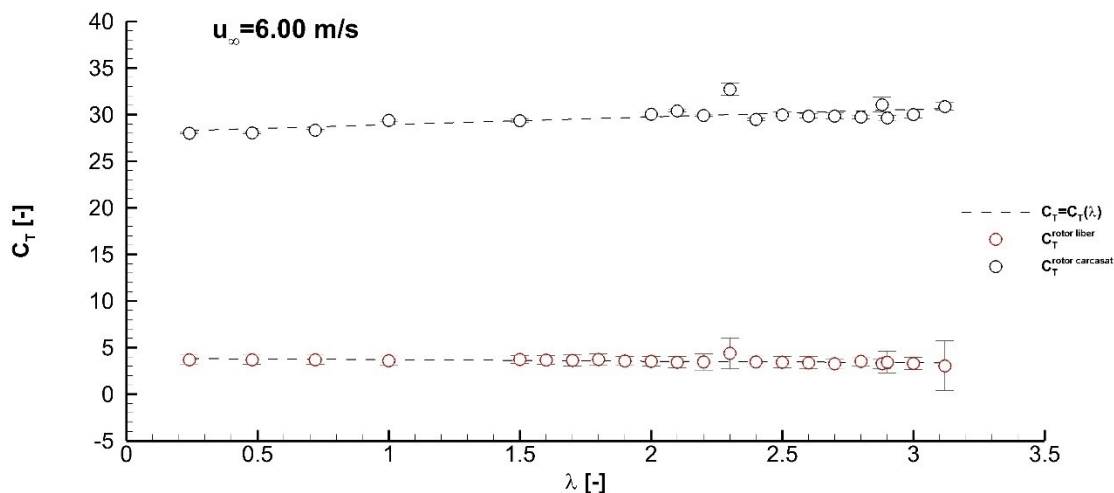


Figura 4.7 – Sarcini statice. Variație coeficient de tracțiune (C_T) în funcție de viteza specifică de rotație (λ) ($u_\infty = 6.00$ m/s)

Din analiza rezultatelor obținute, pe modelul turbinei eoliene cu rotor liber și carcassat, s-a observat faptul că valorile coeficientului de tracțiune (C_T) în funcție de viteza specifică de rotație (λ) variază liniar pentru cele patru viteze ale vântului (u_∞). Pe graficul din Figura 4.7, legile de variație liniară ($C_T(\lambda)$) sunt reprezentate cu linie discontinuă gri.

4.4.3 Evaluarea variației coeficienților de presiune ($c_{p,i}(x/L)$) pe suprafața interioară a carcasei

Valorile coeficienților de presiune ($c_{p,i}$), obținute din măsurătorile de distribuții de presiune locală (p_i) pe suprafața interioară a carcasei v_{11} , sunt reprezentate în funcție de mărimea adimensională x/L . Valorile x/L reprezintă raportul dintre distanța x unde este amplasată o priză de presiune față de bordul de atac al carcasei și lungimea maximă L a carcasei echipată cu dispozitive pasive de control al curgerii.

Din analiza rezultatelor determinate din testele experimentale, s-a constatat faptul că valorile coeficienților de presiune ($c_{p,i}$), ce sunt caracteristice unei viteze specifice de rotație $\lambda = 1.00$, sunt cu mult mai scăzute decât cele obținute pentru restul măsurătorilor.

Testele experimentale alese pentru exemplificare, au fost corespunzătoare pentru viteza specifică de rotație $\lambda = 1.00$, respectiv o valoare a vitezei specifice de rotație apropiată de valoarea optimă a vitezei specifice de rotație (λ_{optim}). Valorile optime ale vitezei specifice de rotație (λ_{optim}) au fost considerate ca fiind cele determinate din curbele polinomiale de aproximare a variației coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_P(\lambda)$).

În Figura 4.7 este reprezentată variația coeficientului de presiune ($c_{p,i}$) pe suprafața interioară a carcasei pentru viteza vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic TASL1-M de aproximativ 6.00 m/s. Rezultatele obținute pentru vitezele de 5.00 m/s, 5.50 m/s și 6.50 m/s sunt prezentate în varianta extinsă a lucrării de cercetare. Cu simboluri de culoare roșie sunt reprezentate valorile coeficienților de presiune ($c_{p,i}$) determinate pentru viteza specifică de rotație $\lambda = 1.00$, iar cu simboluri de culoare neagră sunt reprezentate cele caracteristice unei viteze specifice de rotație apropiată de valoarea optimă (λ_{optim}). De asemenea, valoarea calculată pentru abaterea medie standard ($\sigma(c_{p,i})$) este reprezentată cu linie continuă gri.

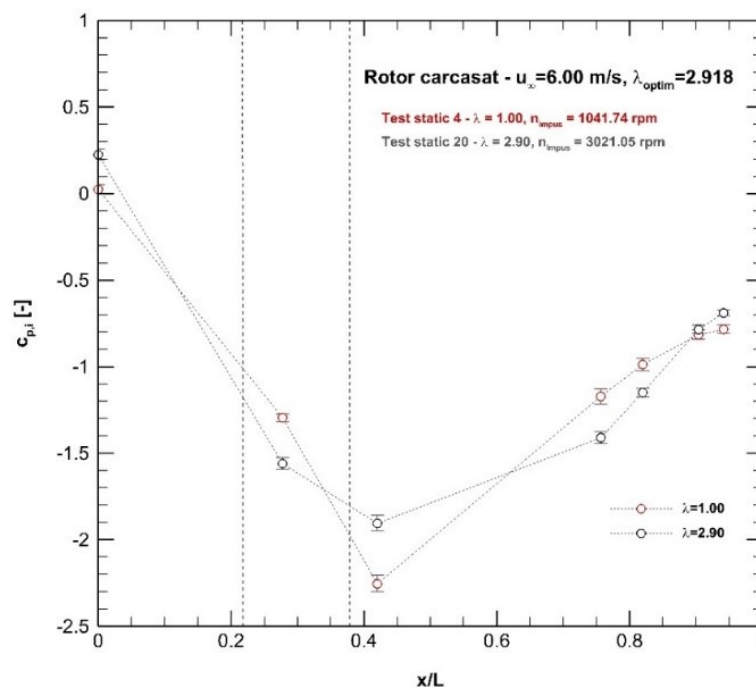


Figura 4.8 – Distribuții de presiune locală. Variație coeficienți de presiune ($c_{p,i}$) în funcție de raportul x/L ($u_\infty = 6.00$ m/s)

S-a observat faptul că, pentru valorile calculate ale abaterilor medii standard ($\sigma(c_{p,i})$), rezultatele obținute se încadrează în intervalele $\pm 2.00\% \div \pm 5.00\%$.

Din analiza rezultatelor prezentate în Figura 4.7, se poate observa faptul că valoarea minimă a coeficienților de presiune ($c_{p,i}$) a fost obținută, așa cum era de așteptat, în secțiunea activă a rotorului turbinei eoliene, unde rata debitului volumic este mai crescută.

Concluzii la capitolul 4

Cercetările experimentale realizate în regim static pe modelul demonstratorului experimental, în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, au stabilit o metodă cu ajutorul căreia au fost evaluate și analizate performanțele globale ale unei turbine eoliene de putere mică.

Din analiza tuturor rezultatelor obținute din cele trei tipuri de teste experimentale realizate pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene sub acțiunea vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic TASL1-M, s-a putut concluziona faptul că prezența carcasei echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii mărește cantitatea de energie cinetică extrasă din vânt, fiind sporite performanțele înregistrate pe agregatul eolian.

5 Testări în regim dinamic pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică în tunelul aerodinamic TASL1-M

5.1 Introducere

Pentru validarea conceptului în condiții controlate și reproductibile de laborator, un al doilea tip de experimente, realizate în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, a constat în cicluri de testare măsurate în regim dinamic pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică.

Pentru a evalua caracteristicile globale de performanță ale agregatului, au fost considerate viteze mici ale vântului (u_{∞}) în tunelul aerodinamic TASL1-M. Teste experimentale realizate pe modelul experimental cu rotor liber și carcasat au presupus monitorizarea, măsurarea și investigarea caracteristicile mecanice ale rotorului (turație (n) și cuplu (M)).

5.2 Planul de investigare experimentală pentru testările realizate în regim dinamic

Pe lângă testele realizate în regim static care au presupus un regim de funcționare cu turație și viteză a vântului constante, pentru a putea investiga comportamentul rotorului pe tot intervalul de valori posibile pentru viteza specifică de rotație (λ), au fost efectuate determinări experimentale la viteze constante ale vântului (u_{∞}), turația (n) rotorului fiind variată continuu de la o valoare minimă de 250 rpm la o valoare maximă de 3250 rpm și înapoi la valoarea minimă.

Vitezele vântului (u_{∞}) în tunelul aerodinamic cu TASL1-M, au fost de aproximativ 5.00 m/s, 5.50 m/s, 6.00 m/s și 6.50 m/s.

Din aplicația sistemului de achiziție, comandă și control al demonstratorului experimental, au fost prestabilite valoarea accelerației (a_{max}), respectiv intervalul de timp (t) ce caracterizează un ciclu tipic de testare. Astfel, au fost măsurate în regim dinamic trei tipuri diferite de teste experimentale. Aceste teste au fost caracterizate de un interval de timp diferit, respectiv de o valoare distinctă a accelerației imprimată modelului.

Pentru cele patru viteze ale vântului (u_{∞}) considerate în planul de investigare experimentală au fost măsurate 12 cicluri în regim dinamic pe modelul cu rotorul liber, respectiv 12 cicluri pe modelul cu rotorul carcasat.

5.3 Prelucrarea datelor achiziționate din testările realizate în regim dinamic

Pentru o analiză corectă a rezultatelor obținute din ciclurile măsurate în regim dinamic, fiecare campanie de măsurători a presupus achiziția a aproximativ 30 000 de eșantioane pe un interval de circa 300 de secunde pentru primul tip de teste experimentale, aproximativ 16 000 de eșantioane pe un interval de timp egal cu 160 de secunde pentru cel de-al doilea tip de cicluri de testare, respectiv, aproximativ 9000 de eșantioane pe un interval de timp de circa 90 de secunde pentru cel de-al treilea tip de teste experimentale. Modalitatea de prelucrare a datelor experimentale a fost identică pentru modelul cu rotor liber și carcasat, fiind parcurse aceleași etape.

5.3.1 Determinarea coeficientului de putere (C_p)

Pentru cei doi parametrii mecanici (n , M) mășurați, modalitatea de prelucrare aleasă a fost de a se calcula valorile mediate ($\tilde{n}$, $\tilde{M}$), prin utilizarea unei ferestre alunecătoare centrate, medierea

realizându-se pe 250 de valori (2.50 secunde). Pentru exemplificarea rezultatelor obținute în urma măsurătorilor pe demonstratorul experimental, au fost alese cele corespunzătoare primului tip de testări realizate în regim dinamic pe modelul cu rotor carcasat. Viteza vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic TASL1-M, a fost de aproximativ 6.00 m/s. Datele specifice primului tip de teste experimentale pe modelul cu rotor liber, dar și cele pentru cel de-al doilea și cel de-al treilea tip de teste realizate în regim dinamic pe modelul cu rotor liber și carcasat, considerând o viteză a vântului (u_∞), în tunelul aerodinamic TASL1-M, egală cu aproximativ 6.00 m/s, sunt prezentate în varianta extinsă a tezei de doctorat.

După cum se poate observa în Figura 5.1 ÷ Figura 5.3, au fost suprapuse atât datele brute (n , M), cât și datele filtrate ($\tilde{n}$, $\tilde{M}$) pentru turația și cuplul măsurate la arborele turbinei. Valorile filtrate determinate pentru cei doi parametri mecanici sunt evidențiate, în Figura 5.1 ÷ Figura 5.3, cu linie discontinuă portocalie.

Datelor experimentale filtrate ($\tilde{n}$, $\tilde{M}$) au fost prelucrate astfel încât să fie determinată variația coeficientului de putere (C_p) în funcție de viteza specifică de rotație (λ) atât pe întreg ciclul de testare măsurat în regim dinamic, cât și pentru zonele de accelerare și decelerare.

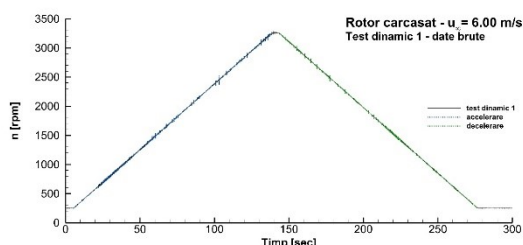


Figura 5.1 – Rotor carcasat. Test dinamic 1. Turație (n).
Date brute ($u_\infty = 6.00$ m/s)

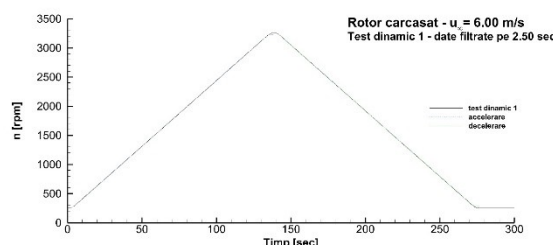


Figura 5.4 – Rotor carcasat. Test dinamic 1. Turație (n).
Date filtrate pe 2.50 sec ($u_\infty = 6.00$ m/s)

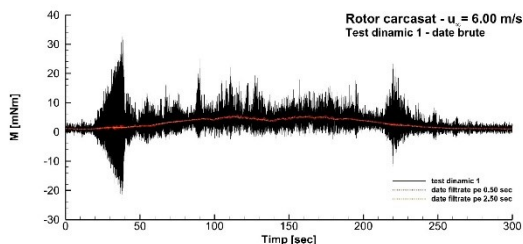


Figura 5.2 – Rotor carcasat. Test dinamic 1. Cuplu (M).
Date brute ($u_\infty = 6.00$ m/s)

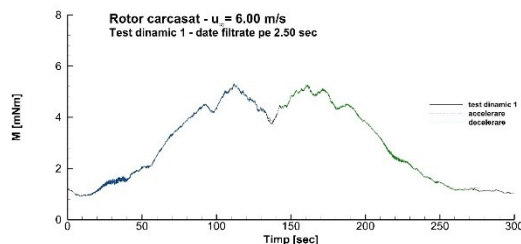


Figura 5.5 – Rotor carcasat. Test dinamic 1. Cuplu (M).
Date filtrate pe 2.50 sec ($u_\infty = 6.00$ m/s)

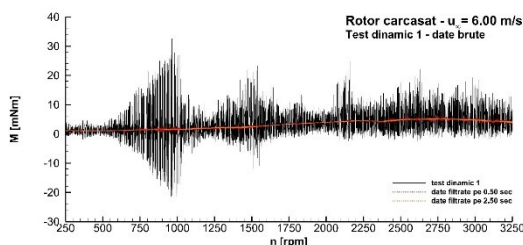


Figura 5.3 – Rotor carcasat. Test dinamic 1. Turație (n)
vs Cuplu (M). Date brute ($u_\infty = 6.00$ m/s)

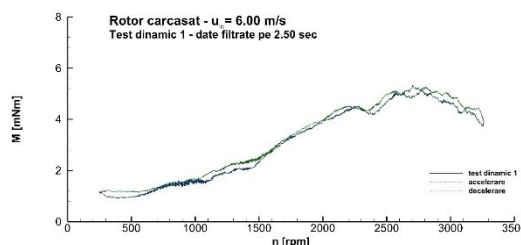


Figura 5.6 – Rotor carcasat. Test dinamic 1. Turație (n) vs
Cuplu (M). Date filtrate pe 2.50 sec ($u_\infty = 6.00$ m/s)

Cu datele astfel obținute, au fost calculate viteza de rotație (ω), puterea extrasă de turbină din vântul în tunelul aerodinamic TASL1-M (P) și puterea teoretică (P_t) a turbinei. Pe baza caracteristicilor detaliate anterior, au fost determinate valorile vitezei specifice de rotație (λ) și coeficientului de putere (C_p). Astfel, a fost determinată variația coeficientului de putere în funcție

de viteza specifică de rotație ($C_p(\lambda)$). Datele obținute, au fost reprezentate atât pe întreg ciclul de testare considerat, cât și pentru zonele de încărcare și descărcare caracteristice testelor experimentale, obținute prin eliminarea palierelor de turație constantă din datele brute.

5.3.2 Re-eșantionarea variației coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_p(\lambda)$)

O altă etapă ce a trebuit parcursă în prelucrarea datelor experimentale a fost reprezentată de re-eșantionarea curbelor de variație a coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_p(\lambda)$), obținute pentru zonele de încărcare și descărcare corespunzătoare fiecărui tip de test experimental măsurat în regim dinamic.

Re-eșantionarea curbelor de variație ($C_p(\lambda)$) a fost realizată prin intermediul unui algoritmul dezvoltat în programul Matlab [26], considerând frecvența de re-eșantionare egală cu 100 Hz. Astfel, curbele de variație re-eșantionate au fost construite la un pas constant $\Delta\lambda$. De asemenea, pentru fiecare ciclu dinamic re-eșantionat a fost determinată o curbă de variație ca fiind media dintre zona de accelerare și cea de decelerare corespunzătoare fiecărui ciclu măsurat în regim dinamic ($\overline{C_p}(\lambda^{re})$).

5.4 Rezultate finale. Interpretarea rezultatelor

Prelucrarea datelor achiziționate experimental din testele experimentale măsurate în regim dinamic, a fost evaluată prin curbe de variație a coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație pe întreg ciclul de testare ($C_p(\lambda)$), dar și pentru zonele de încărcare și descărcare specifice ciclului re-eșantionat. De asemenea, pentru fiecare ciclu tipic de testare re-eșantionat a fost determinată curba de variație medie a coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($\overline{C_p}(\lambda^{re})$).

5.4.1 Evaluarea variației coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_p(\lambda)$)

Reprezentările grafice din Figura 5.7 corespund primului tip de teste măsurate în regim dinamic pe modelul experimental cu rotor liber și carcasat. Viteza vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic a fost de aproximativ. Rezultatele obținute pentru testările în regim dinamic pe modelul demonstratorului cu rotor liber și carcasat, pentru viteze ale vântului aproximativ egale cu 5.00 m/s, 5.50 m/s și 6.50 m/s, sunt detaliate în varianta extinsă a tezei de doctorat.

Astfel, în Figura 5.7, variația ($C_p(\lambda)$), determinată prin utilizarea valorilor filtrate pe 2.50 secunde pentru întreg ciclul de testare, este reprezentată cu simboluri gri. Curbele de variație obținute din re-eșantionarea datelor sunt marcate cu simboluri albastre pentru zona de accelerare ($C_p^{acc,re}(\lambda^{re})$), și verzi pentru zona de decelerare ($C_p^{dec,re}(\lambda^{re})$). Cu linie continuă gri este marcată aria rezultată între cele două curbe de variație pentru zona de încărcare și descărcare corespunzătoare fiecărui test efectuat în regim dinamic ($C_p^{re}(\lambda^{re})$). Curbele de variație medie ($\overline{C_p}(\lambda^{re})$), determinate din valorile re-eșantionate specifice zonelor de accelerare și decelerare ale fiecărui test experimental sunt reprezentate cu simboluri de culoare portocalie.

În Figura 5.7, este evidențiat faptul că pentru modelul cu rotor liber, dar și pentru cel cu rotor carcasat, valorile coeficientului de putere (C_p) cresc pe măsură ce viteza vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic TASL1-M crește. Această creștere a fost observată atât pentru zona de accelerare, cât și pentru cea de decelerare specifică fiecărui test măsurat în regim dinamic.

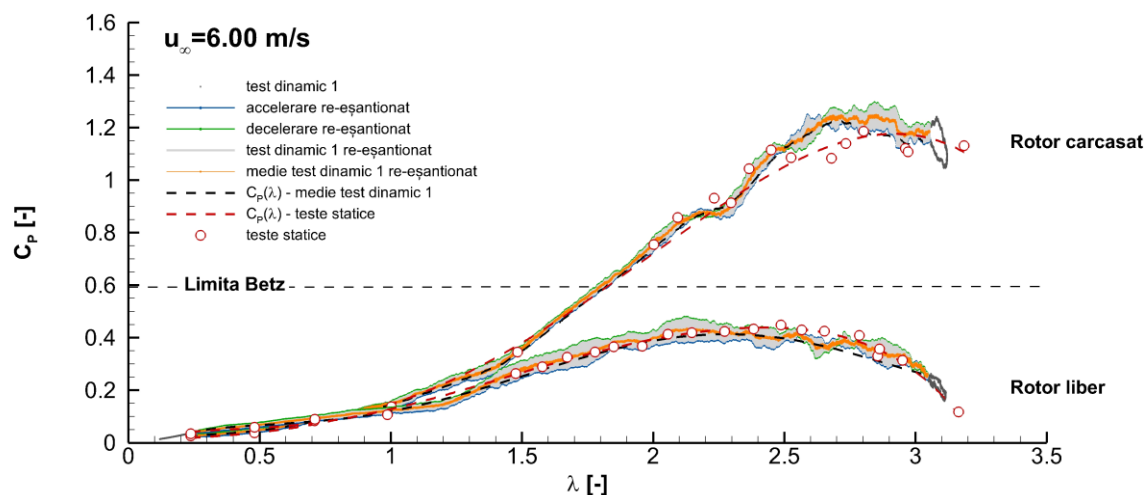


Figura 5.2 – Test dinamic 1. Variație coeficient de putere (C_p) în funcție de viteza specifică de rotație (λ) ($u_\infty = 6.00$ m/s)

Din analiza rezultatelor prezentate în Figura 5.7, se observă faptul că pe modelul experimental cu rotor carcasat au fost obținute valori mai ridicate pentru coeficientul de putere (C_p) comparativ cu cele determinate pe modelul cu rotor liber.

După cum se poate observa, în Figura 5.7, valorile obținute pentru coeficientul de putere (C_p) pe modelul cu rotor liber, nu depășesc valoarea limitei Betz ($C_p^{Betz} = 0.593$). Se poate constata faptul că pentru modelul cu rotor carcasat, rezultatele obținute pentru coeficientul de putere (C_p) depășesc limita Betz ($C_p^{Betz} = 0.593$), atât pentru zona de încărcare, cât și pentru cea de descărcare corespunzătoare fiecărui test măsurat în regim dinamic.

Pentru a putea fi evidențiate performanțele turbinei cu rotorul liber și carcasat, s-a constatat faptul că din rezultatele obținute pentru testele măsurate în regim dinamic pot fi trasate curbe polinomiale de aproximare a variației coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_p(\lambda)$). Aceste curbe au fost obținute pentru fiecare tip de test măsurat pe modelul experimental. Astfel, pentru toate vitezele vântului (u_∞) considerate în planul de investigare experimentală, a fost calculată media curbelor de variație medie corespunzătoare celor trei tipuri distincte de teste realizate pe modelul cu rotor liber și carcasat. În Figura 5.7, curbele polinomiale de aproximare sunt evidențiate cu linie discontinuă de culoare neagră.

Concluzii la capitolul 5

Testele experimentale efectuate în regim dinamic pe modelul demonstratorului experimental au reprezentat o a doua modalitate prin intermediul căreia au fost mășurați și investigați, în condiții de laborator, parametrii de funcționare ai turbinei eoliene de putere mică.

Din analiza rezultatelor obținute din testele experimentale, s-a constatat faptul că performanțele înregistrate pe modelul carcasat sunt net superioare celor determinate pe modelul cu rotor liber. De asemenea, valorile coeficientului de putere determinate din teste măsurate pe modelul carcasat au depășit limita lui Betz ($C_{p,optim}^{rotor\ carcasat} > C_p^{Betz} = 0.593$). Pentru modelul cu rotor liber, valorile coeficientului de putere s-au situat sub limita lui Betz ($C_{p,optim}^{rotor\ liber} < C_p^{Betz} = 0.593$).

6 Concluzii finale

6.1 Introducere

Prezenta lucrare de cercetare intitulată "Analiza experimentală a parametrilor de funcționare ai turbinelor eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii" a avut drept scop validarea prin investigații experimentale, în mediu controlat de laborator, a unui nou concept de agregat eolian. Rezultatele cercetării au urmărit atingerea unui nivel de maturitate tehnologică egal cu TRL4, pornind de la un nivel echivalent cu TRL3 [1÷2] pentru o nouă tehnologie de captare a energia din vânt în situri unde potențialul eolian este slab sau în mediul construit, utilizând turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii.

6.2 Concluzii generale

Cercetările realizate în prezenta lucrare au urmărit validarea, în mediu de laborator, a unui nou concept de agregat eolian prin teste experimentale realizate pe un demonstrator experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii. Pentru aceasta au fost efectuate serii ample de determinări experimentale după cum urmează:

1. Teste experimentale realizate în regim static și dinamic pe modelul demonstratorului experimental cu rotor liber și carcassat. Acest tip de măsurători au fost realizate considerând patru viteze distincte ale vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M. Rezultatele obținute din aceste tipuri de experimente au evaluat performanțele obținute pentru modelul agregatului cu rotor liber, respectiv cu rotor carcassat.

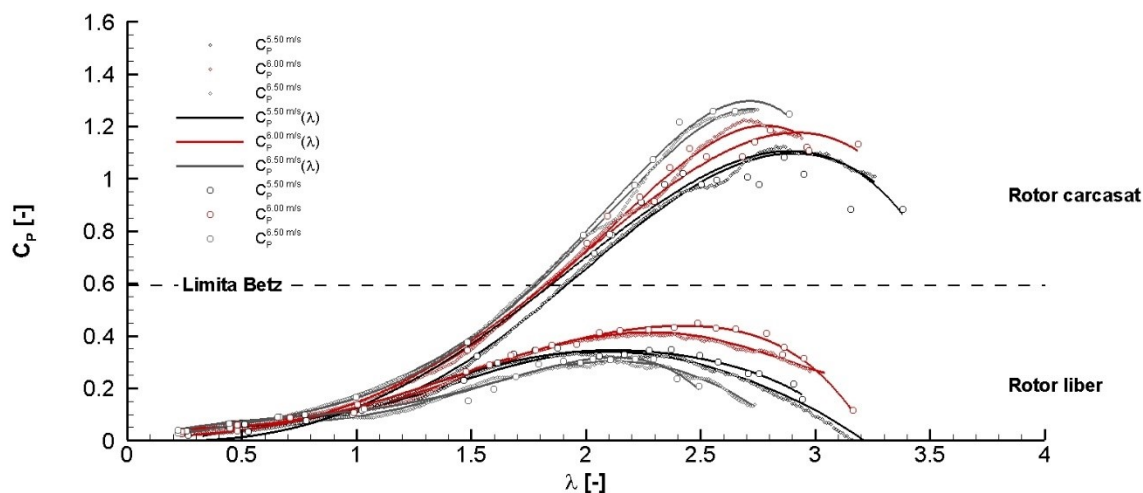


Figura 6.1 – Teste statice și teste dinamice. Suprapunere variație ($C_p(\lambda)$) ($u_\infty = 5.50 \div 6.50$ m/s)

Pentru o viteză a vântului (u_∞) de aproximativ 5.00 m/s s-a constatat faptul că datorită vitezei mici a vântului în vena experimentală, a tunelului aerodinamic TASL1-M, nu au fost obținute rezultate concludente, iar performanțele înregistrate pe modelul experimental, nu au putut fi comparate coerent cu cele determinate pentru vitezele vântului de aproximativ 5.50 m/s, 6.00 m/s, respectiv 6.50 m/s. Aceste rezultate sunt prezentate și detaliate în varianta extinsă a lucrării de cercetare.

În Figura 6.1, cu simboluri diferențiate în funcție de viteza vântului (u_∞) considerată în tunelul aerodinamic TASL1-M sunt reprezentate, rezultatele determinate din testele măsurate în regim static și dinamic pe modelul agregatului cu rotor liber și carcasat.

Din analiza reprezentărilor grafice din Figura 6.1 se observă faptul că pentru curbele polinomiale de aproximare a variației coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_p(\lambda)$), determinate pentru testele măsurate în regim static și dinamic, a fost obținută forma tipică a curbelor de putere, ce evaluează performanțele unei turbine eoliene.

De asemenea, se poate remarca faptul că pentru rezultatele obținute din testele măsurate în regim static și dinamic pe demonstratorul experimental, odată cu creșterea vitezei vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, punctul optim de operare este mutat. Acest lucru se datorează faptului că o viteză mai mare a vântului (u_∞) implică o viteză specifică de rotație mai mică (λ) și, implicit, o valoare mai mare a coeficientului de putere (C_p).

Pentru rezultatele corespunzătoare vitezelor de 5.50 m/s, 6.00 m/s și 6.50 m/s în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M, a fost evidențiat faptul că pentru punctele optime de funcționare ale agregatului cu rotor liber și carcasat au fost obținute valori comparabile din măsurătorile realizate în regim static și dinamic, dar și din curbele polinomiale de aproximare a variației coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație.

Pentru rezultatele ce cuantifică performanțele obținute pe modelul turbinei cu rotor carcasat, s-a constatat faptul că acestea depășesc limita lui Betz ($C_p^{Betz} = 0.593$). Pentru turbina cu rotorul liber, rezultatele obținute din testările experimentale în regim static și dinamic, dar și din curbele polinomiale de aproximare au evidențiat faptul că nu a fost depășită limita lui Betz.

Prin compararea performanțelor obținute pe demonstratorului experimental pentru turbine eoliene, atât din testele experimentale măsurate în regim static și dinamic (C_p), cât și din curbele polinomiale de aproximare ($C_p(\lambda)$) se poate observa faptul că atât pe modelul cu rotor liber, cât și pe modelul cu rotor carcasat performanțele agregatului cresc pe măsură ce viteza vântului (u_∞) în tunelul aerodinamic cu strat limită TASL1-M crește.

Din analiza cantitativă a performanței înregistrate pe modelul cu rotor carcasat, comparativ cu cea obținută pe modelul cu rotor liber a fost observată o creștere globală de peste 65%.

Având la bază rezultatele prezentate în Figura 6.1, se poate concluziona faptul că, pornind de la un nivel de dezvoltare tehnologică egal cu TRL3, utilizând un demonstrator experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii, a fost atins un nivel de dezvoltare tehnologică echivalent cu TRL4.

2. Teste experimentale ce au presupus evaluarea încărcărilor statice din vânt ce acționează pe modelul demonstratorului experimental pentru turbine eoliene de putere mică, realizate în paralel cu măsurarea ciclurilor în regim static.

În Figura 6.2 sunt suprapuse rezultatele finale obținute pentru coeficientului de tracțiune (C_T) în funcție de viteza specifică de rotație (λ), considerând cele patru viteze distincte ale vitezei vântului (u_∞) pentru care au fost realizate teste experimentale în tunelul aerodinamic TASL1-M.

În Figura 6.2, este evidențiat faptul că valorile determinate pentru coeficientul de tracțiune (C_T) sunt de aproximativ 6 ori mai mari pe modelul cu rotor carcasat decât cele determinate pentru modelul cu rotor liber.

De asemenea, în Figura 6.2, se poate remarca faptul că, atât pentru modelul cu rotor liber, cât și pentru modelul cu rotor carcasat, variația coeficientului de rezistență la înaintare (C_T) în funcție de viteza specifică de rotație (λ) este influențată de viteza vântului (u_∞) din tunelul aerodinamic TASL1-M, dar nu într-un mod semnificativ cât să afecteze comportamentul agregatului pentru condițiile de operare studiate.

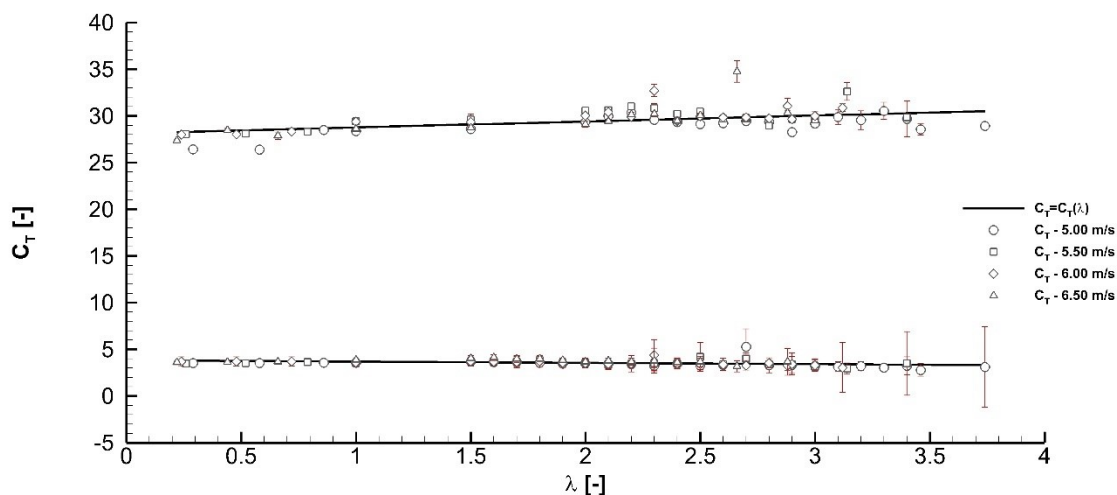


Figura 6.2 - Sarcini statice. Suprapunere variație ($C_T(\lambda)$) ($u_\infty = 5.00 \div 6.50$ m/s)

3. **Determinări experimentale ce au presupus măsurarea distribuțiilor de presiune locală a presiunilor pe suprafața interioară a carcasei v_{11} , realizate în paralel cu determinările experimentale în regim static.**

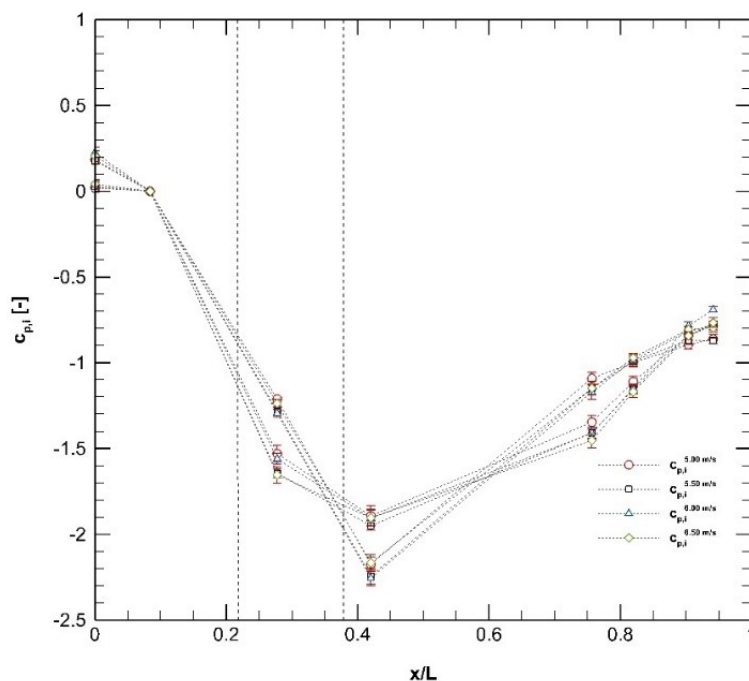


Figura 6.3 - Distribuții de presiune locală. Suprapunere variație coeficienți de presiune ($c_{p,i}$) ($u_\infty = 5.00 \div 6.50$ m/s)

În Figura 6.3 sunt reprezentate, valorile coeficienților de presiune ($c_{p,i}$) corespunzătoare unei viteze specifice de rotație egală cu $\lambda = 1.00$, respectiv $\lambda \cong \lambda_{optim}$.

Din analiza rezultatelor determinate din testele experimentale, s-a constatat faptul că valorile coeficienților de presiune ($c_{p,i}$), pentru o viteză specifică de rotație $\lambda = 1.00$, sunt cu mult mai scăzute decât cele obținute pentru restul măsurătorilor. Aceste rezultate au fost observate

pentru cele patru viteze distincte ale vântului (u_∞) considerate în planul de investigare experimentală.

De asemenea, din reprezentarea grafică a rezultatelor din Figura 6.3, se poate observa faptul că valoarea minimă a coeficienților de presiune ($c_{p,i}$) a fost obținută, în secțiunea activă a rotorului turbinei eoliene, unde secțiunea carcaseri este minimă, iar rata debitului volumic este mai crescută. Pe baza celor expuse anterior, se poate concluziona faptul că în zona de secțiune minimă a carcaseri se înregistrează un câștig de energie cinetică, fiind astfel sporite performanțele obținute pe modelul turbinei cu rotor carcasat.

6.3 Contribuții personale și originale ale autorului în domeniul de specialitate

Cele mai importante contribuțiile personale și originale ale autorului, în desfășurarea cercetării doctorale pot fi sintetizate astfel:

1. Măsurători în regim static (158 cicluri măsurate) și în regim dinamic (24 cicluri măsurate) pe modelul experimental cu rotor liber și carcasat.
2. Evaluarea în paralel cu ciclurile măsurate în regim static pe demonstratorul experimental, a încărcărilor statice din vânt (158 teste măsurate), respectiv a distribuțiilor locale de presiune pe suprafața interioară a carcaseri (71 teste măsurate).
3. Stabilirea unor metodologii de prelucrare a datelor achiziționate în urma tuturor tipurilor de teste experimentale efectuate pe demonstratorul de laborator în tunelul aerodinamic TASL1-M.
4. Conceperea și realizarea unui demonstrator experimental pentru turbine eoliene de putere mică echipate cu dispozitive pasive de control al curgerii, reprezintă o contribuție originală în domeniu. Testele experimentale realizate pe demonstratorul experimental au contribuit la validarea noi tehnologii de captare a energiei eoliene din zone cu potențial redus sau în mediul construit, ce corespunde unui nivel de maturitate tehnologică echivalentă cu TRL4.
5. Realizarea unei metode complet nouă pentru cuantificarea performanțelor agregatelor eoliene, rezultată din testări realizate în regim dinamic în tunele aerodinamice. Elementul de noutate introdus în domeniul de specialitate, a constat în determinarea unor curbe ce reprezintă media dintre curba de variație corespunzătoare zonei de încărcare și descărcare specifică fiecărui ciclu măsurat în regim dinamic, ce cuantifică variația coeficientului de putere în funcție de viteza specifică de rotație ($C_p(\lambda)$).

6.4 Direcții viitoare de cercetare

Perspectivile privind continuarea pe viitor a cercetărilor, care pot constitui bazele unor noi teme ce pot fi abordate pentru domeniul de specialitate se referă la:

1. Continuarea planului de investigare experimentală pe demonstratorul experimental pentru cuantificarea performanțelor ($C_p(\lambda)$) obținute din testări în regim static și dinamic, dar și evaluarea, considerând viteze mai mari ale vântului în tunelul aerodinamic TASL1-M (de exemplu 7.00 m/s, 7.50 m/s etc.).
2. Măsurători PIV (Particle Image Velocimetry) sincronizate cu rotorul turbinei pot fi efectuate pe demonstratorul experimental deja existent, într-un plan radial simetric în spatele turbinei eoliene.
3. Pentru a avea continuitate, viitoarele teme de cercetare, în acest domeniu, pot fi bazate pe dezvoltarea tehnologiei până la atingerea unui nivel de maturitate tehnologică echivalent cu TRL8, ce reprezintă un sistem complet și calificat pentru producția de energie în zone cu potențial eolian redus.

Bibliografie selectivă

- [1] Olabi, A.G., *State of the art on renewable and sustainable energy*, Energy, Vol. 61, pp. 2-5, 2013.
- [2] Sesto, E., Casale C., *Exploitation of wind as an energy source to meet the world's electricity demand*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 74-76, pp. 375-387, 1998.
- [3] Igra, O., *Research and development for shrouded wind turbines*, Energy Conversion and Management, Vol. 21, pp. 13-48, 1981.
- [4] Coșoiu, C.I. et al., *Numerical study on the efficiency between the ducted and the free stream rotor of horizontal axis wind turbine*, Proceedings of the EWEA 2011 Conference, 14-17 March 2011, Brussel, Belgium, 2011.
- [5] Coșoiu, C.I. et al., *Numerical predictions of the flow around a profiled casing equipped with passive flow control devices*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 114, pp. 48-61, 2013.
- [6] Brown, L.R., *World on the edge-How to prevent Environmental and Economic Collapse*, Earth Policy Institute, ISBN 978-0-393-08029-2, 2011.
- [7] GWEC, Global Wind Energy Council, Global Wind Statistic 2018. Disponibil la adresa: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>, accesat la data de 10.01.2018.
- [8] Degeratu, M. et al., *Potențialul energetic eolian în zona litoralului românesc al Mării Negre*, Lucrările Conferinței Internaționale de Energie și Mediu-CIEM 2003, Academia Română 1, S1, pp. 1-6, 22-25 Octombrie 2003, București, România, 2003.
- [9] Kosasih, P. B., Bryce, N., Tondelli, A., Beazley, A., *Experimental Study of the Performance of Bare and Nozzle – Diffuser Shrouded Micro Wind Turbine under axial and non-axial Inflow Condition*, 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, Vol.1, pp. 110-113, 2012.
- [10] Matsushima, T. et al., *Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser*, Renewable Energy, Vol. 31, pp. 1343-1354, 2006.
- [11] Ohya, Y. et al., *Development of shrouded wind turbine with a flange diffuser*, Journal Wind Engineering Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp. 524-539, 2008.
- [12] Wang, F. et al., *The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp. 1-24, 2008.
- [13] Abe, K., Ohya, Y., *An investigation of flow fields around flange diffusers using CFD*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 99, pp. 315-330, 2004.
- [14] Gilbert, B.L., Foreman K.M., *Experiments with diffuser – augmented model wind turbine*, Transactions of the ASME, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 105, pp. 46-53, 1983.
- [15] Wang, X., Shen, W.Z., Wei, J.Z., Jens, N.S., Chen, J., *Shape optimization of wind turbine blades*, Wind Energy, Vol. 12 (8), pp. 781-803, 2009.
- [16] Chen, L., Ponta, F.L., Lago, L.I., *Perspectives on innovative concepts in wind-power generation*, Energy for Sustainable Development, Vol. 15, pp. 398-410, 2011.
- [17] National Renewable Energy Laboratory, disponibil la: <https://wind.nrel.gov/airfoils/AirfoilFamilies.html>, accesat la data de 30.03.2019.
- [18] Dumitrache, Al., et al., *Calculul elicei*, Editura Academiei Române, București, 1990.
- [19] Wing Design, disponibil la: http://www.aero.us.es/adesign/Slides/Extra/Aerodynamics/Design_Wing/Chapter%205.%20Wing%20Design.pdf, accesat la data de 30.03.2019.
- [20] Coșoiu, C.I., Grant de cercetare PN-III-P1-2.1-PED-2016-0631, *Turbină eoliană carcasată de putere mică echipată cu dispozitive pasive de control al curgerii (SWAN 3_4)*, UEFISCDI, 2016.

- [21] Vlăduț, C.A., Popa, I., Coșoiu, C., Georgescu, A.M., Degeratu, M., Hașegan, L., Anton, A., *A new boundary layer wind tunnel*, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Vol. 79 (2), pp. 159-168, Bucharest, Romania, 2017.
- [22] Popa, I., Chiulan, E.A., Anton, A., *Experimental study for variable roughness in the new boundary layer wind tunnel TASL1-M*, Bulletin of Transilvania University of Brașov IPC 2017, Vol. 10 (59), Brașov, Romania, 2017.
- [23] Iamandi, C., et al., *Hidraulica Instalațiilor. Vol. I*, Editura Tehnică, București, 1994.
- [24] Dumitrache, Al., et al., *Calculul elicei*, Editura Academiei Române, București, 1990.
- [25] Batankhah, M., Porte-Agel, F., *A new miniature wind turbine for wind tunnel experiments. Part I: Design and Performance*, Energies, Vol. 10, pp. 908-927, 2017.
- [26] Matlab, <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/resample.html>, accesat la data de 18.08.2019.

Listă de publicații

- [1] Chiulan, E.A., Popa, I., Anton, A., *Experimental study on an aeroelastic model of a television tower in the boundary layer wind tunnel*, Bulletin of Transilvania University of Brașov IPC 2017, Vol. 10 (59), pp. 14-17, 2017.
- [2] Popa, I., Chiulan, E.A., Anton, A., *Experimental study for variable roughness in the new boundary layer wind tunnel TASL1-M*, Bulletin of Transilvania University of Brașov IPC 2017, Vol. 10 (59), Brașov, Romania, 2017.
- [3] Chiulan, E.A., Popa, I., Vlăduț, A.C., Coșoiu, C.I., Georgescu, A.M., Anton, A., Degeratu, M., *Experimental investigation on the behavior of a tall and slender building placed in a turbulent boundary layer*, Proceedings of CIEM 2017, 19-20 October 2017, Bucharest, Romania, 2017.
- [4] Coșoiu, C.I., Chiulan, E.A., Vlăduț, A.C., *Numerical simulation on the global performances of a small ducted wind turbine*, Tensor 2017 – Efficiency and Innovation through Numerical Simulation, 4 October 2017, Bucharest, Romania, 2017.
- [5] Georgescu, A.M., Chiulan, E.A., Coșoiu, C.I., Degeratu, M., *Inlet velocity boundary conditions for Computational Wind Engineering simulations*, CWE 2018 – International Symposium on Computational Wind Engineering, 18-22 June 2018, Seoul, North Korea, 2018.
- [6] Coșoiu, C.I., Chiulan, E.A., Degeratu, M., Vlăduț, A.C., *Numerical simulation of the flow around a wind turbine experimental model*, CWE 2018 – International Symposium on Computational Wind Engineering, 18-22 June 2018, Seoul, North Korea, 2018.
- [7] Georgescu, A.M., Coșoiu, C.I., Degeratu, M., Vlăduț, A.C., Chiulan, E.A., *Numerical predictions of the flow around a small ducted wind turbine equipped with passive flow control devices*, Proceedings of the Romanian Academy, Bucharest, Romania, 2018 (spre publicare).
- [8] Chiulan, E.A., Georgescu, A.M., Coșoiu, C.I., Anton, A., *Spreadsheet solution for the computation of the mean wind speed and turbulence intensity profiles according to the Romanian standard*, Proceedings of EENVIRO Conference 2018, 10-13 October 2018, Cluj-Napoca, Romania, 2018.
- [9] Chiulan, E.A., Georgescu, A.M., Coșoiu, C.I., Anton, A., *Predictions on the dynamic behavior of an aeroelastic model of a television tower in the boundary layer wind tunnel*, Proceedings of DSC Conference 2018, 26 October 2018, Bucharest, Romania, 2018.
- [10] Vlăduț, A.C., Coșoiu, C.I., Georgescu, A.M., Degeratu, M., Hașegan, L.V., Chiulan, E.A., Florea, I.B., *Experimental study of the wind loading on a multifunctional sports hall model*, Proceedings of CIEM 2019, 17-18 October 2017, Timișoara, Romania, 2019.